

## **Підготовчі процеси збагачення**

6. Whittles, D.N., Kingman, S., Lowndes, I., and Jackson, K. Laboratory and numerical investigation into the characteristics of rock fragmentation. Minerals Engineering, vol. 19, 2006. – pp. 1418-1429.

7. Евсеев, В.Д. Природа эффекта Ребиндера при разрушении горных пород // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 11. – С. 38-40.

8. Сокур Н.И. Теоретические основы движения материала на рабочем органе центробежно-ударной дробилки / Н. И. Сокур, Л. М. Сокур, И. Н. Сокур // Вісн. Кременчуц. держ. політехн. ун-ту. – 2009. – Вип. 1, ч. 1. – С. 85-88.

9. Сокур М.І., Сокур Л.М., Сокур І.М. Інноваційна технологія дроблення магнетитових кварцитів в полі відцентрових сил та її вплив на ефективність рудопідготовки. // Вісник НТУ ХПІ – 2013, № 57. – Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – С. 115-120.

© Сокур М.І., Білецький В.С., Божик Д.П., Сокур Л.М., 2019

*Надійшла до редколегій 06.12.2018*

*Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*

УДК 622.788.36

<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.17819.11044>

**М.І. СОКУР**, д-р техн. наук,

**М.С. СТРЮКОВ, А.О. БОГДАН,**

(Україна, Харків, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»)

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ БАРАБАННИХ МЛИНІВ**

*Постановка проблеми і стан її вирішення.* Процес руйнування (дроблення і подрібнення) мінеральної сировини є найбільш енергоємною і трудомісткою технологічною операцією збагачення корисних копалин [1-4, 6-8, 11]. Процес подрібнення детермінує по суті весь цикл збагачення, а також суміжних процесів, зокрема, способи і ефективність розділення мінеральної сировини на концентрат і відходи, автоматизації гірничого виробництва, стан водношламового господарства збагачувальної фабрики [7, 9-11].

У технології збагачування руд найбільш енергоємним процесом є дезінтеграція (дроблення і подрібнення) руд, частка якого складає понад 60% енерговитрат, які пропорційні новій відкритій внаслідок руйнування мінеральних зерен, поверхні. Відомо, що тільки 5% енергії потрібно на процеси дроблення, а близько 60% – на процеси подрібнення [1-4].

Зниження витрат електроенергії на дезінтеграцію руд є надзвичайно важливою науково-технічною проблемою.

*Мета і задачі досліджень* – розробка математичного апарата для розрахунку енергетичних параметрів барабанних млинів.

*Виклад основного матеріалу.* Повна потужність  $N_e$ , споживана електродвигуном привода барабанного млина з електромережі витрачається на приведення

в рух помельних тіл – корисна потужність  $N_0$  і на покриття ряду втрат (у барабані, що обертається, на приводному механізмі і в самому електродвигуні).

Корисна витрата потужності  $N_0$  залежить від параметрів механічного режиму і визначається за теоретичними або емпіричними формулами, приведеними нижче.

Втрати енергії в барабані складаються з втрати на холостий хід, яким відповідає потужність холостого ходу  $N_{хол}$  (що витрачається на обертання барабана за відсутності в ньому матеріалу і помельних тіл) і додаткової втрати в підшипниках цапф, що з'являється під дією ваги кульового або стрижньового завантаження і пульпи, на що витрачається потужність  $N_{доп}$ .

Повна потужність на осі барабана  $N_{\delta}$  є сумою трьох доданків:

$$N_{\delta} = N_0 + N_{хол} + N_{доп}. \quad (1)$$

Втрати на приводному механізмі (зубчата передача, редуктор) враховуються введенням механічного коефіцієнта корисної дії (ККД) передач  $\eta$  (в середньому для барабанних млинів  $\eta_{п} \approx 0,8$ ). Звідси потужність на валу електродвигуна

$$N_B = N_{\delta} / \eta_{п}.$$

Номінальна потужність електродвигуна  $N_{ДВ}$  призначається з деяким запасом в порівнянні з розрахунковою потужністю на валу,

$$N_{ДВ} = K_3 N_B. \quad (2)$$

де  $K_3$  – коефіцієнт запасу (звичайно  $K_3 = 1,1$ ).

Повна потужність, споживана електродвигуном з електромережі  $N_e$  залежить від ККД електродвигуна (в середньому  $\eta_e = 0,92$ )

$$N_e = \frac{N_B}{\eta_n} = \frac{N_{\delta}}{\eta_n \eta_e}. \quad (3)$$

Найбільший доданок у формулі (1) – корисна потужність  $N_0$ , що витрачається на приведення в рух помельного середовища. Для неї застосовна узагальнена формула В. А.Олевського [12]:

$$N_0 = A \gamma_{usc} V \sqrt{DS_0}, \text{ кВт}, \quad (4)$$

де

$$A = \frac{1000 \sqrt{2g}}{102 \cdot 6\pi} = 2,31 \text{ м}^{1/2} \cdot \text{с}^{-1}$$

## **Підготовчі процеси збагачення**

(постійна величина);  $\gamma_{ис}$  – об'ємна вага помельних тіл (кульового або стрижньового завантаження);  $V$  – робочий об'єм барабана,  $m^3$ ;  $D$  – діаметр барабана у світлі,  $m$ ;  $S_0$  – безрозмірний коефіцієнт корисної потужності, залежний від параметрів механічного режиму і коефіцієнта тертя помельних тіл об футерування.

Доданки, що входять в початкову формулу  $N_{хол}$  і  $N_{дон}$  визначаються за емпіричними формулами, встановленими в результаті випробувань. Для потужності холостого ходу застосована формула [12]:

$$N_{хол} = 3\sqrt{2\sqrt{DL\psi}}, \text{ кВт}, \quad (5)$$

де  $D_0$  – номінальний діаметр барабана,  $m$ ;  $L$  – довжина барабана,  $m$ ;  $\psi$  – відносна швидкість, частки одиниць.

Додаткові втрати на тертя в підшипниках, що з'являються за наявності подрібнюючого середовища, пропорційні втратам холостого ходу, причому коефіцієнт пропорційності  $K_{ш}$ , рівний відношенню маси повного завантаження млина до маси решти частин, що обертаються.

$$N_{дон} = K_{ш}N_{хол}. \quad (6)$$

Коефіцієнт  $K_{ш}$  залежить від розміру млинів і їх заповнення. При  $\psi = 45\%$  рекомендують приймати: для найменших млинів (від МШР-900×900 до МШР-1500×1600) –  $K_{ш} = 0,25$ ; для малих (МШР-2100×1500 і МШР-2100×2200) –  $K_{ш} = 0,4$ ; для середніх (МШР-2700×2100 і МШР-2700×2700) –  $K_{ш} = 0,5$  і для великих  $K_{ш} = 0,6$ .

У формулі (1) головну роль відіграє корисна потужність  $N_0$ , оскільки доданки  $N_{хол}$  і  $N_{дон}$  складають значно меншу частину загальної споживаної потужності. Для малих млинів (об'ємом менше  $5 m^3$ ) витрата потужності на холостий хід складає 25-30%, для млинів середніх розмірів – знижується до 10-15% і для великих (об'ємом  $22 m^3$  і вище) знижується до 4-5% повної потужності  $N_0$  на осі барабана [12].

При теоретичному визначенні корисної потужності  $N_0$  обчислюють коефіцієнт потужності  $S_0$ , що входить в узагальнену формулу. Розрізняють два режими: тихохідний (каскадний, або змішаний, з переважанням перекочування) і швидкохідний (змішаний з переважанням польоту куль або чисто водоспадний).

При тихохідному режимі для розрахунків придатні формули С.Є. Андреева. При швидкохідному режимі для визначення корисної потужності запропоновано декілька варіантів розрахунку, заснованих на різних гіпотезах про кількість енергії, що витрачається на рух помельних тіл.

Н.П. Неронов вважає, що при обчисленні корисної потужності  $N_0$  необхідно враховувати тільки ту частину роботи, яка витрачається на підйом мелючих

тіл. В цьому випадку коефіцієнт потужності матиме наступну залежність від параметрів  $\psi$  і  $K$ :

$$S_0^1 = \psi^3 [3(1 - K^4) - 2\psi^4(1 - K^6)], \quad (7)$$

де  $K$  – відносний радіус, визначений за таблицею [12].

Величина  $N_0$ , що отримується після підстановки значення  $S_0^1$  в узагальнену формулу, близька до дослідних даних тільки за малої відносної швидкості ( $\psi \leq 75\%$ ); за великої вона дає занижені результати.

При виведенні формули запропонованої Л.Б. Левенсоном, З.Б. Конторовичем і С.Е. Андрєєвим [13] приймається, що вся енергія, якою володіє мелоче тіло у момент відриву, тобто сума потенціальної енергії, що дорівнює роботі на підйом, і кінетичної цілком втрачається ним при ударі і тому повинна бути компенсована електродвигуном повністю. В цьому випадку коефіцієнт потужності дорівнює

$$S_0^n = S_0^1 + \frac{3}{8}\psi^3(1 - K^4), \quad (8)$$

де  $S_0^1$  – відповідає формулі Н.П. Неронова, а другий доданок враховує кінетичну енергію куль.

Формула (8) дає завищені результати в порівнянні з дослідними даними.

У теорії Девіса використовується загальна теорія удару пружних тіл (теорема Карно) і удар вважається абсолютно непружним. Формула Девіса, виправлена П.М. Сиденко і Н.П. Нероновим [12], має вид

$$S_0^1 = \psi^3 [6(1 - K^4) - 8\psi^4(1 - K^6) + 3\psi^8(1 - K^8)] \quad (9)$$

Корисна потужність, обчислена за формулою (4) приблизно в 1,5 рази перевершує дослідні дані.

В.А. Олевський [14] припускає, що корисна витрата енергії визначається тільки радіальною складовою швидкості падіння куль (стрижнів) у момент удару, тоді як енергія, пов'язана з їх рухом по дотичній, майже повністю повертається барабану при падінні (ударі) і компенсація цієї витрати з боку електродвигуна не потрібна. Крім того, враховується (введенням чисельного значення 0,94) той факт, що в ударній дії і в споживанні енергії не беруть участь кулі центральної ("мертвої") зони кульового завантаження. При цих припущеннях теоретичний коефіцієнт корисної потужності дорівнює:

$$S_0^{IV} = 0,94\psi^7 [16(1 - K^6) - 36\psi^4(1 - K^8) + 28,8\psi^8(1 - K^{10}) - 8\psi^{12}(1 - K^{12})]. \quad (10)$$

Формула дає хороший збіг з дослідними даними за умови, якщо відносна швидкість обертання  $\psi$  не перевищує 84%.

Крім теоретичних, на основі узагальнення експериментальних даних, за-

## Підготовчі процеси збагачення

пропонований ряд чисто емпіричних формул для визначення корисної потужності.

З емпіричних формул найбільш застосовуються формули, отримані при випробуваннях вуглерозмельних млинів і прийняті при складанні норм ВТІ-ЦКТІ [12]. Стосовно рудних млинів відповідний коефіцієнт потужності приблизно визначається по формулі

$$S_0^V = 2,65\varphi\psi^{0,9}. \quad (11)$$

Для швидких розрахунків може бути використаний графік функції  $S_0^V$ , зображений на рис. 1.

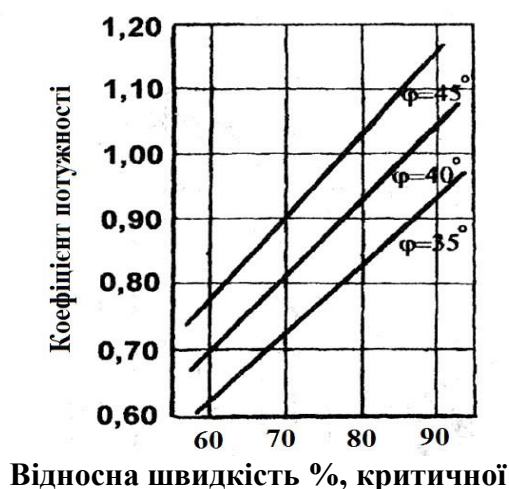


Рис. 1. Коефіцієнт потужності  $S_0^V$ , обчислений за емпіричною формулою [12]

Згідно дослідів Хуккі [15], в лабораторних кульових і стрижньових млинах потужність збільшується у функції відносної швидкості за законом прямої лінії до деякої точки, при якій досягає свого максимуму, після чого різко падає, оскільки млин незабаром переходить на режим махового колеса.

Були проведені дослідження моделі кульового млина (300×300 мм) з прозорою торцевою стінкою, через яку рух куль був знятий на кіноплівку. Установлено, що при всіх швидкісних режимах млина всередині його кульового завантаження створюється нерухома зона (ядро), навколо якої відбувається циркуляція куль. Дослідами НДІ Важмаша підтверджені криві Хуккі і дані Гау: при заповненні  $\varphi=45\%$  корисна потужність моделі досягає максимуму при швидкості  $\psi_m=95\%$  критичної, що близьке до даних Хуккі та Гау (див. рис. 1 і 2).

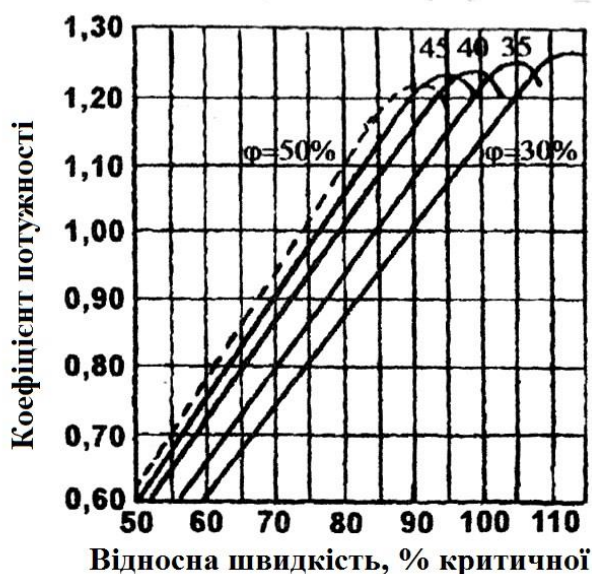


Рис. 2. Коефіцієнт потужності  $S_0^{VI}$ , обчислений за дослідями Гау

Гау [13] рекомендує користуватися при розрахунках графіками потужності, що споживається дослідним млином розмірами 610×610 мм і об'ємом 0,178 м<sup>3</sup>.

Графіки Гау можуть бути використані для визначення коефіцієнта корисної потужності  $S_0$ .

Коефіцієнт потужності  $S_0^{VI}$  може бути визначений безпосередньо за дослідями Гау як функція  $\varphi$  і  $\psi$ .

### Висновки

Розроблено математичний апарат для розрахунку енергетичних параметрів барабанних млинів.

Розроблений математичний апарат застосований при розрахунку енергетичних параметрів електроприводів барабанних млинів та іншого дробильно-подрібнювального обладнання, яке виготовляється, зокрема, на Маріупольському заводі важкого машинобудування.

### Список літератури

1. Сокур М.І. та ін.. Дезінтеграція мінеральних ресурсів: монографія / Сокур М. І., Кіянський М. В., Воробйов О. М., Сокур Л. М., Сокур І. М. – Кременчук: видавництво ПП Щербатих О. В., 2014 – 304 с.
2. Сокур М.І., Білецький В.С. та ін. Підготовка корисних копалин до збагачення: монографія / Сокур М.І., Білецький В.С., Єгурнов О.І., Воробйов О.М., Смирнов В.О., Божик Д.П. – Кременчук: Кременчуцький національний ун-т ім. М.Остроградського, Академія гірничих наук України. ПП Щербатих О.В., 2017. – 392 с.
3. Сокур Н.И. Экономия энергоресурсов при дезинтеграции минерального сырья // Пути экономии ресурсов при обогащении руд: сборник научных статей / Минмет СССР, Ин-т Механобчермет. – М; Недра, 1990. – С. 3-8.

## **Підготовчі процеси збагачення**

---

4. Сокур М.І., Білецький В.С., Сокур Л.М., Сокур І.М. Математичне моделювання електроспоживання на дробильно-подрібнюючих комплексах ГЗК // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2017. – Вип. 65(106). – С. 72-77.
5. Папушин Ю. Л. Основи автоматизації гірничого виробництва. / Папушин Ю.Л., Білецький В.С.; Донец. нац. техн. ун-т, Донец. відділення Наук. т-ва ім. Шевченка. – Донецьк: Сх. вид. дім, 2007. – 168 с.
6. Сокур М.І., Сокур І.М. Маркетинг енергоресурсів при збагаченні руд: Монографія. – Кременчук: ПП. Щербатих, 2006. – 300с.
7. Смирнов В.О., Білецький В.С., Шолда Р.О. Переробка корисних копалин (монографія). Донецьк: Східний видавничий дім. 2013. 600 с.
8. А.К. Mehrotra, R.K. Singhal. Environmental issues and management of waste in energy and mineral production: Proceedings of the Sixth International Conference on Environmental Issues and Management of Waste in Energy and Mineral Production: SWEMP 2000; Calgary, Alberta, Canada, May 30 – June 2, 2000. Rotterdam [u.a.]: Balkema. 2000. pp. 257-260.
9. Сергєєв П.В. Селективна флокуляція вугілля / П. В. Сергєєв, В. С. Білецький ; ДонДТУ, Донец. від-ня Наук. т-ва ім. Т.Г. Шевченка. – Донецьк : Сх. вид. дім – 1999. – 136 с.
10. Самилін В. М. Спеціальні методи збагачення корисних копалин: Курс лекцій / В.М. Самилін, В.С. Білецький; Донец. нац. техн. ун-т, Донец. від-ня Наук. т-ва ім. Шевченка . – Донецьк : Сх. вид. дім, 2003 . – 115 с.
11. Вугільна промисловість України і Польщі: сучасний стан та перспективи / Володимир Білецький, Анна Козловська // Схід. – 2008. – № 7. – С. 3–10.
12. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы. Под. ред. О.С. Богданова, В.А. Олевского. – 2-е издание., перераб., доп. – М.: Недра, 1982. – 365с.
13. Андреев С.Е., Перов В.А., В.В. Зверевич. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых М.: Недра, 1980. – 250 с.
14. Олевский В.А. Размольное оборудование обогатительных фабрик – М.: Гостехиздат. – 1963. – 198 с.
15. Хукки Р.Т. Новые закономерности тонкого измельчения // Цветные металлы, 1958, №10.

© Сокур М.І., Стрюков М.С., Богдан А.О., 2019

*Надійшла до редколегій 06.12.2018  
Рекомендовано до публікації д.т.н. В.С. Білецьким*