

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, Полтава, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка),

**Л.М. СОКУР** канд. техн. наук, **І.М. СОКУР**

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

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ НА ДРОБИЛЬНО-ПОДРІБНЮЮЧИХ КОМПЛЕКСАХ ГЗК

*Постановка проблеми і стан її вирішення.* Процес руйнування (дроблення і подрібнення) мінеральної сировини є найбільш енергоємною і трудомісткою технологічною операцією збагачення корисних копалин [1-3]. Дослідження енергоємності процесів рудопідготовки, у тому числі і дезінтеграції руди, які проводилися в Україні та сусідніх країнах на 14-ти найбільших гірничо-збагачувальних комбінатах, що переробляють різну за фізико-механічними властивостями сировину, дають можливість кількісно оцінити і порівняти характеристики енергоспоживання у процесах збагачувального переділу. З одержаних даних витікає, що на процес дезінтеграції руд припадає 50-70% загальних витрат, при цьому витрата електроенергії на подрібнення складає в середньому близько 60%, а на дроблення всього 5% (рис. 1). Тому зниження витрат електроенергії на дезінтеграцію руд є надзвичайно важливою науково-технічною проблемою.

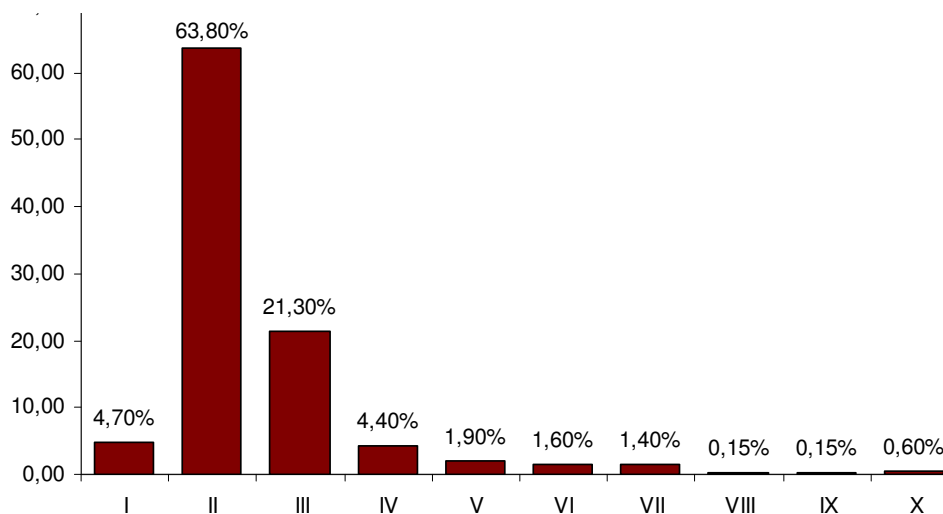


Рис. 1. Діаграма розподілу енергоспоживання по окремих процесах на дробильно-подрібнюючих комплексах ГЗК:

I – дроблення; II – подрібнення; III – транспорт пульпи; IV – конвеєрний транспорт;

V – зневоднення; VI – магнітна сепарація; VII – сантехнічне устаткування;

VIII – класифікація; IX – освітлення; X – інші споживачі

Вирішення проблеми зниження енерговитрат на дробильно-подрібнюючих комплексах ГЗК можливе шляхом моделювання енергоспоживання, виділення основних факторів, які на нього впливають, і відповідного управління процесом з метою зниження енерговитрат.

При моделюванні електроспоживання технологічних переділів залізородних гірничо-збагачувальних підприємств Ляхомський О.В. та Фомін В.В. [4, 5] виділяють такі значимі фактори: переробка по руді (продуктивність фабрики), вміст загального заліза в руді, виробництво концентрату, об'єм води на подрібнення. Цільову функцію при моделюванні – питоме споживання електроенергії кВт год/т руди – знаходять методами регресійного аналізу.

При використанні для управління виробництвом АСУТП – моделювання і управління енергоспоживанням одна з важливих підсистем АСУ [6].

У роботах [7-11] поряд з режимними параметрами дроблення і подрібнення знайдені також конструктивні параметри дробарки (млина), які впливають на споживання енергії.

Слід зауважити, що наявна практика математичного моделювання електроспоживання дробильно-подрібнюючих комплексів збагачувальних фабрик у різних наукових шкіл дещо різна. Загальним є те, що за цільову функцію при моделюванні приймають питоме споживання електроенергії (найчастіше на 1 т руди), а варіативними приймають дві групи факторів:

- 1) режимні параметри дроблення і подрібнення;
- 2) конструктивні характеристики дробарок і млинів.

Разом з тим, конкретні варіативні параметри у двох зазначених групах приймаються різними, що, очевидно, обумовлено як специфікою поставлених техніко-технологічних задач, так і різними підходами різних шкіл дослідників.

*Мета статті* – математичне моделювання електроспоживання дробильно-подрібнюючих комплексів збагачувальних фабрик ГЗК.

Задачі роботи:

- одержати модельні рівняння для розрахунку енергоспоживання дробильної фабрики ГЗК, зокрема, питомих витрат електроенергії на 1 т дробленої руди; річних витрат електроенергії на дроблення;

- одержати модельні рівняння для розрахунку енергоспоживання помольного відділення фабрики ГЗК, зокрема, питомих витрат електроенергії на подрібнення 1 т початкової руди для фабрик з кульовими і стрижньовими млинами; питомі витрати електроенергії на 1 т концентрату; питомі витрати електроенергії для збагачувальних фабрик з самоподрібненням на 1 т початкової руди та на 1 т концентрату; загальних витрат електроенергії на фабриці з самоподрібненням.

*Виклад основного матеріалу.* Вихідна інформація формувалася на основі масиву даних, зібраного на 14-ти найбільших гірничо-збагачувальних комбінатах України і сусідніх країн, зокрема, Інгuleцький гірничо-збагачувальний комбінат, Новокриворізький гірничо-збагачувальний комбінат, Південний гірничо-збагачувальний комбінат, Північний гірничо-збагачувальний комбінат,

## **Підготовчі процеси збагачення**

Центральний гірничо-збагачувальний комбінат та ін. На підставі результатів досліджень побудовані математичні моделі енергоспоживання процесів дроблення і подрібнення руди.

Рівняння множинної кореляції енергоспоживання дробильної фабрики має вигляд:

$$\begin{aligned} E_{уд.др.} = & -8,83 - 0,0975X_1 + 0,0535X_2 + 107,2X_3 - \\ & 3,63X_4 - 2,93X_5 + 0,015X_6 + 13,4X_7 + \\ & 19,9X_8 + 2,98X_9 + 11,2X_{10} + 0,002X_{11} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} E_{г.др.} = & -84,8 + 1,2X_1 + 0,506X_2 + 2,07X_3 - 70,4X_4 + \\ & + 53,6X_5 + 14,06X_6 + 59,08X_7 + 114,8X_8 + 60,3X_9 + \\ & 58,4X_{10} + 0,12X_{11} \end{aligned} \quad (2)$$

де:  $E_{уд.др.}$  – питомі витрати електроенергії на 1 т дробленої руди, кВт год/т;  $X_1$  – річна продуктивність дробильної фабрики;  $X_2$  – міцність руди – (ум. од.);  $X_3, X_4, X_5, X_6$  – приведений розмір розвантажувальної щілини дробарок стадії відповідно крупного, редуційного, середнього і дрібного дроблення %;  $X_7, X_8, X_9, X_{10}$  – встановлені потужності відповідно стадій крупного, редуційного, середнього і дрібного дроблення %;  $X_{11}$  – крупність вихідної руди %;  $E_{г.др.}$  – річні витрати електроенергії на дроблення, кВт·год.

Коефіцієнт множинної кореляції для рівнянь 0,96-0,98.

Рівняння множинної регресії питомих і загальних витрат електроенергії на помольних відділеннях збагачувальних фабриках:

$$\begin{aligned} E_{уд1} = & 30,706 - 0,465Y_1 + 0,07Y_2 + 0,021Y_3 + \\ & + 0,177Y_4 - 0,131Y_5 + 0,02Y_6 - 0,023Y_7 - 0,007Y_8 - \\ & - 4,348Y_{10} + 0,206Y_{11} - 0,734Y_{12} + 0,296Y_{13} + 3,6Y_{14} + \\ & + 0,026Y_{15} + 0,718Y_{16} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} E_{уд2} = & 269,91 - 1,644Y_1 + 0,14Y_2 - 1,307Y_3 - 0,602Y_4 - \\ & - 0,285Y_5 + 0,042Y_6 - 0,127Y_7 - 0,0714Y_8 - 84,576Y_9 + \\ & + 0,116Y_{10} + 1,458Y_{11} - 3,673Y_{12} + 1,187Y_{13} + 0,114Y_{14} - \\ & - 0,129Y_{15} + 2,471Y_{16} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} E_{уд3} = & 69,1 + 0,29Y_1 + 0,12Y_2 + 0,29Y_4 - 0,32Y_5 + \\ & + 0,11Y_6 - 0,03Y_7 - 0,004Y_8 - 125,1Y_9 - 3,6Y_{10} + \\ & + 0,45Y_{11} - 0,38Y_{12} + 0,21Y_{13} + 0,06Y_{14} + 0,31Y_{15} + \\ & + 0,35Y_{16} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} E_{вд4} = & 866,233 - 0,269Y_2 - 0,0014Y_4 + 9,77Y_5 - \\ & - 5,59Y_6 + 0,02Y_7 - 1068,11Y_9 - 13,42Y_{10} + 0,301Y_{14} + \\ & + 0,776Y_{16} - 0,02Y_1Y_2 + 0,02Y_1Y_4 + 212,6Y_1 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} E_{вд5} = & 949,327 - 0,022Y_2 - 4,64Y_4 - 13,62Y_5 + \\ & + 30,44Y_6 - 8,33Y_7 + 1,301Y_9 + 1441,8Y_{10} - 65,92Y_{14} - \\ & - 4,039Y_{15} + 7,622Y_{16} + 0,002Y_3Y_4 + 0,338Y_3Y_6 - \\ & - 78,67Y_3Y_{11} + 0,081Y_3Y_{15} + 0,105Y_3Y_{16} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} E_3 = & 0,261 - 0,002Y_2 - 0,019Y_4 - 0,1384Y_5 - 0,026Y_6 + \\ & + 0,1914Y_7 + 0,025Y_9 + 26,75Y_{10} - 0,876Y_{14} - \\ & - 0,0576Y_{15} + 0,31Y_{16} \end{aligned} \quad (8)$$

де:  $E_{вд}$  – питома витрата електроенергії на 1 т початкової руди для фабрик з кульовими і стрижньовими млинами;  $Y_1$  – загальна кількість переробленої руди, млн.т;  $Y_2$  – об'єм млинів по РОФ, м<sup>3</sup>;  $Y_3$  – вихід концентрату %;  $Y_4$  – вмісту класу +20 мм в початковій руді %;  $Y_5$  – вміст класу -0,074 мм в концентраті %;  $Y_6, Y_7, Y_8$  – циркуляційне навантаження відповідно першої, другої і третьої стадій подрібнення %;  $Y_9$  – частота обертання барабана млина %;  $Y_{10}$  – приведений діаметр млинів, м;  $Y_{11}, Y_{12}, Y_{13}$  – ступінь заповнення помольними тілами, відповідно першої, другої і третьої стадій подрібнення %;  $Y_{14}, Y_{15}$  – загальна встановлена потужність фабрик і млинів, кВт;  $Y_{16}$  – питома витрата води на 1 т концентрату м<sup>3</sup>/т;  $E_{вд}$  – питома витрата електроенергії на 1 т концентрату, кВт·год/т;  $E_{вд4}$  – питома витрата електроенергії для збагачувальних фабрик з самоподрібненням на 1 т початкової руди, кВт·год/т;  $E_{вд5}$  – те ж, на 1 т концентрату, кВт·год/т;  $E_6$  – загальна витрата електроенергії на фабриці самоподрібненням, кВт·год;  $E_3$  – загальна витрата електроенергії по фабриці, кВт·год;

Коефіцієнт множинної кореляції для рівняння складає 0,96-0,99.

### *Висновки*

1. Аналіз парних коефіцієнтів кореляції в отриманих рівняннях дозволяє зробити висновки про ступінь впливу різних чинників на витрати електроенергії на дезінтеграцію руди і розробити науково-обґрунтовані заходи щодо їх зниження.

2. Одержані моделі відрізняються від відомих тим, що:

- питомі витрати електроенергії на 1 т дробленої руди, кВт год/т визначені в залежності від: – річної продуктивності дробильної фабрики; – міцності руди; – приведенного розміру розвантажувальної щілини дробарок стадії відповід-

## **Підготовчі процеси збагачення**

но крупного, редуційного, середнього і дрібного дроблення; – встановленої потужності відповідно стадій крупного, редуційного, середнього і дрібного дроблення; – крупності вихідної руди;

- питомі витрати електроенергії на 1 т початкової руди для фабрик з кульовими і стрижньовими млинами визначені в залежності від: загальної кількості переробленої руди; – об'єму млина; – виходу концентрату; – вмісту класу +20 мм у вихідній руді; – вмісту класу -0,074 мм в концентраті; – циркуляційного навантаження відповідно першої, другої і третьої стадій подрібнення; – частоти обертання барабана млин; – приведенного діаметра млинів; – ступеня заповнення млина помольними тілами, відповідно першої, другої і третьої стадій подрібнення; – загальної встановленої потужності фабрик і млинів; – питомої витрати води на 1 т концентрату.

### **Список літератури**

1. Справочник по обогащению руд: Т. 1. Подготовительные процессы./ Под ред. О.С. Богданова, В.А. Олевского – М.: Недра, 1982. – 366 с.
2. Дезінтеграція мінеральних ресурсів: монографія / М.І. Сокур, М.В. Кіяновський, О.М. Воробйов та ін. – Кременчук: Видавництво ПП Щербатих О.В., 2014. – 304 с.
3. Смирнов В.О., Білецький В.С. Підготовчі процеси збагачення корисних копалин. – Донецьк: Східний видавничий дім, Донецьке відділення НТШ, 2012. – 284 с.
4. Ляхомский А.В., Фомин В.В. Моделирование электропотребления технологических переделов железорудных горно-обогатительных предприятий. // Горный информационно-аналитический бюллетень: Науч.-техн. журнал. – 2011. – Вып. № S4. – С. 53-61.
5. Ляхомский А.В., Фомин В.В. Оценка значимости технологических факторов и моделирование процесса электропотребления при обогащении железосодержащих руд// Горный информационно-аналитический бюллетень: Науч.-техн. журнал. – 2011. – Вып. № S4. – С. 81-88.
6. Принципы построения математических моделей в АСУТП производства железорудных окатышей / А.П. Буткарев, Е.В. Некрасова, Н.Г. Машир и др. // Сталь. – 1990. – №3. – С. 15-21.
7. Rambabu Pothina, Vladislav Kecojevic e. a. A Gyrotory Crusher Model and Impact Parameters Related to Energy Consumption. // Minerals and Metallurgical Processing 24(3). August 2007. P. 170-180 .
8. James G. Donovan. Fracture toughness based models for the prediction of power consumption, product size, and capacity of jaw crushers // Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in mining and minerals engineering. – July 2003 blacksburg, va. – 211 p. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/28544/Dissertation.pdf?sequence=1>
9. M. Silva, A. Casali. Modelling SAG milling power and specific energy consumption including the feed percentage of intermediate size particles // Minerals Engineering. – 2015. – № 70. – P. 156.161.
10. Сокур М.І., Сокур І.М. Маркетинг енергоресурсів при збагаченні руд: Монографія. – Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2006. – 300 с.
11. Сокур М.І., Воробйов О.М., Сокур І.М. Енергозбереження в процесах збагачення руд: монографія. – Кременчук: ПП Щербатих, 2012. – 298 с.

© Сокур М.І., Білецький В.С., Сокур Л.М., Сокур І.М., 2017

*Надійшла до редколегії 02.02.2017 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*