

DOI:

УДК 622.236.2:517

**Г.П. Брехаря**, д.ф.-м.н., професор,

Інститут металофізики ім. Курдюмова НАН України, Київ

**Н.П. Бондарь**, bondar\_np@ukr.net

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

## **ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ МЕХАНОАКТИВАЦІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ АНАЛІЗУ КРИВИХ РОЗПОДІЛУ ЧАСТИНОК ПОРОШКУ ЗА ЇХ РОЗМІРАМИ**

*В роботі показані результати дослідження дисперсності гематитовмісного рудного матеріалу в залежності від ступеню подрібнення. Гематитова руда, основними фазовими складовими якої є оксиди  $\text{SiO}_2$  і  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , піддавалась механоактивації в вібраційному млині. Теоретичне описання кривих розподілу відносної кількості частинок за їх розмірами дозволило визначити оптимальні режими механообробки ( $\tau_{\text{подр.}}=70$  год.), що сприяють кращому розкриттю мінералів і подальшому відокремленню залізистовмісної складової від кварцу.*

**Ключові слова:** гематитовмісний матеріал, механоактивація, дисперсність.

*The results of the study of the dispersion of hematite-containing ore material, depending on the degree of grinding, are shown in the paper. Hematite ore, the main phase components of which are  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  oxides, were mechanically activated in a vibration mill. The theoretical description of the distribution curves of the relative number of particles in their sizes allowed to determine the optimal modes of machining ( $\tau=70$ h.), which facilitate better disclosure of minerals and the subsequent separation of the iron-containing component of quartz.*

**Keywords:** hematite-containing material, mechanoactivation, dispersion.

### **Постановка проблеми**

Подрібнення рудного матеріалу є невід'ємним етапом підготовки руди до процесів збагачення та очищення від пустої породи. Відомо, що механообробка, окрім збільшення дисперсності порошку, також впливає на фізико-хімічні властивості отриманого матеріалу. Тому за допомогою механоактивації можна не лише контролювати розмір частинок, але й досягати певних цілей.

Так, для актуального на сьогоднішній день способу бездоменного отримання чистого заліза з залізорудної сировини важливими є процеси розкриття мінералів під час подрібнення (розкол матеріалу вздовж площин зростання різних фазових складових) та збільшення поверхневої площі часток, необхідне для кращого протікання відновлювальних реакцій.

### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Згідно з літературними даними механоактивацію часто використовують з метою прискорення хімічних процесів [1, 2], а в останній час, як метод вирішення екологічної проблеми, пов'язаної з накопиченням відходів металургійного виробництва [3, 4].

### **Формулювання мети дослідження**

Тому, метою даної роботи є дослідження та прогнозування впливу механоактивації на перебіг відновлювальних процесів  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$ .

### **Виклад основного матеріалу**

Для досліджень була обрана Криворізька гематитова руда, основними фазовими складовими якої є  $\text{SiO}_2$  і  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Залізорудний матеріал піддавали подрібненню у вібраційному млині. Дослідження дисперсності отриманих порошоків проводилися із застосуванням мікроскопу МБС-2. Для виміру розмірів частинок порошку та визначення найбільш вірогідного значення лінійної характеристики для загальної кількості частинок за фотознімками використовували метод січних, який найчастіше знаходить застосування при проведенні кількісних металографічних досліджень. Загальна кількість частинок при дослідженні кожного порошку, розміри яких визначались, складає  $N = 500$ . Така кількість вимірів дозволяє вважати отримані результати середньостатистичними для всієї кількості частинок порошку.

На рис. 1 наведені отримані криві розподілу відносної кількості частинок рудного порошку різного ступеню подрібнення в вібраційному млині за їх розміром, згідно з яким вихідна гематитова руда являє собою полідисперсний порошок, середній розмір якого дорівнює  $\approx 20$  мкм.

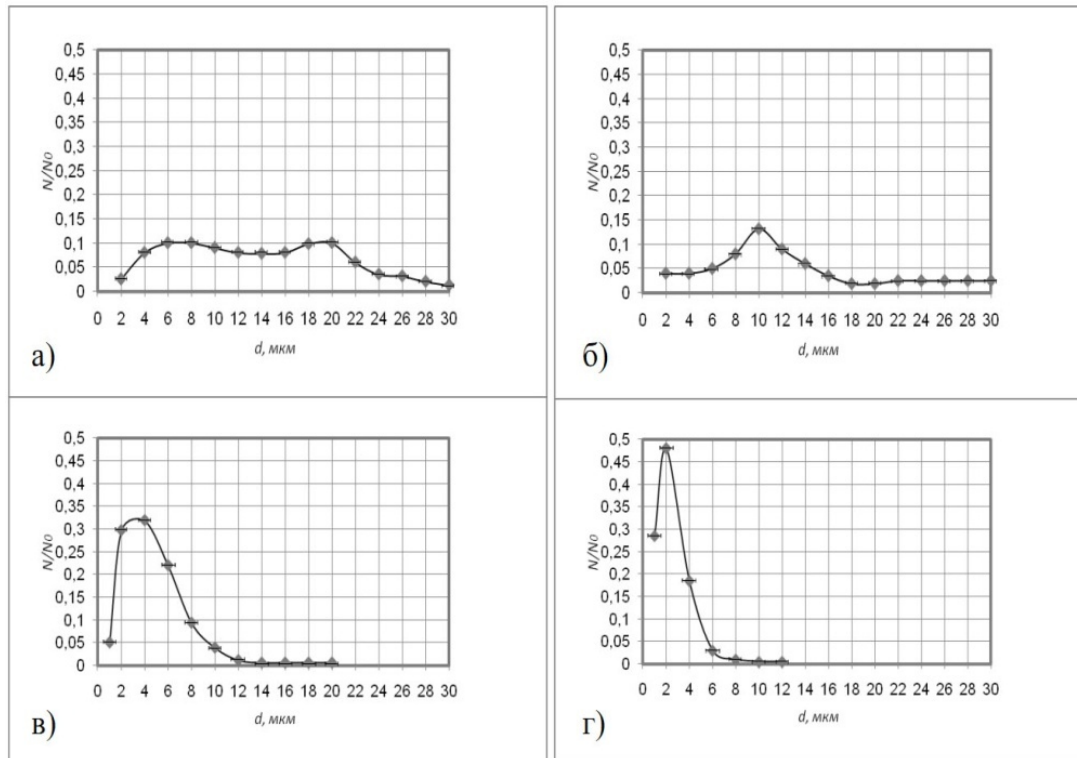


Рис. 1. Розподіл відносної кількості частинок порошку гематитовмісного матеріалу за їх розмірами в вихідному стані (а) та після подрібнення в вібраційному млині: б) 10год., в) 40год., г) 70год.

Вже після 10год. подрібнення залізорудного порошку в вібраційному млині графік розподілу  $N/N_0(d)$  має чітко виражений максимум, що відповідає найбільш ймовірному розміру частинок, який становить 10мкм. При подальшому подрібненні гематитовмісного матеріалу збільшується монодисперсність порошку та зменшується середній розмір його частинок. Так, після подрібнення протягом 40 год. третя частина порошків має розмір 4 мкм, збільшення часу подрібнення до 70 год. призведе до зменшення розміру майже половини з усіх частинок до 2 мкм.

Враховуючи отримані розподіли частинок за їх розмірами можна побудувати графік залежності середнього розміру порошків гематитової руди в залежності від часу подрібнення в вібраційному млині (рис. 2).

Для оптимізації енергії активації та часу подрібнення були проведені теоретичні розрахунки кривих розподілу. Відомо, що функція розподілу частинок в більшості випадках має один максимум асиметричної форми з крутим спадом у бік дрібних частинок і пологим — у бік великих. Приклади математичного описання кривих розподілу наведені в [5].

Асиметричні криві розподілу в загальному випадку задаються рівнянням:

$$\frac{dN}{dX} = F\left(\frac{(X - X_{\min})(X_{\max} - X)}{X_{\max} - X_{\min}}\right) = F(X),$$

де  $F(X)$  — логарифмічно нормальна функція;  $X$  — розмір частинок, що змінюється в межах  $X_{\min} < X < X_{\max}$ .

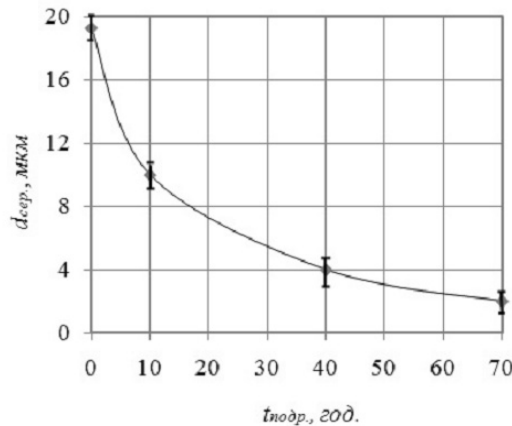


Рис. 2. Залежність середнього розміру частинок порошку гематитовмісного матеріалу від часу подрібнення.

Дане рівняння носить назву неідеального логарифмічно-нормального закону та складне у застосуванні. На практиці частіше використовують диференціальне рівняння розподілу, яке задається виразом:

$$F(X) = AX^m \exp(-\alpha X^p),$$

де  $A$  — константа нормировки, а ступінь  $m$  записують у вигляді  $m = m_0 + n$ . Параметри  $m_0$ ,  $\alpha$ ,  $p$  визначають гостроту максимуму і ступінь асиметричності кривої,  $n$  — ціле число. Таким чином, для розподілу кількості частинок за їх розмірами  $F(X) = dN/dX$   $m = m_0$  ( $n = 0$ ), для розподілу поверхневої площі частинок  $F(X) = dS/dX$   $m = m_0 + 2$ , для розподілу за об'ємами  $F(X) = dV/dX$   $m = m_0 + 3$ .

В роботі експериментально отримані дані були математично описані за допомогою програми Wolfram Mathematica.

Як видно з графіку (рис. 3, а) на попередній стадії подрібнення до складу порошку входить два найбільш імовірні розміри часток: 6 мкм та 20 мкм. Криві, що відповідають двом максимумам, можна описати наступними математичними залежностями:

$$F_1(X) = 52,05X^{-1,93} \exp(-10,62X^{-0,74}),$$

$$F_2(X) = 0,001(X - 10)^{7,61} \exp(-2,84(X - 10)^{0,67}).$$

Перший максимум відповідає кварцитам, які мають високу кристалографічну анізотропію, а також підвищену крихкість. Другий максимум відповідає подрібненню симетричних мінералів  $Fe_2O_3$ .

Через 10 год. подрібнення (рис. 3, б) спостерігається утворення одного максимуму, але отриманий розподіл погано піддається математичному описанню. Зі збільшенням часу подрібнення крива розподілу (рис. 3, в) наближається до загального вигляду Гауссовської кривої та, як показують розрахунки, після подрібнення гематитовмісного матеріалу в вібраційному млині протягом 70 год. (рис. 3, г) експериментально отримані дані повністю задовольняють рівняння:

$$F(X) = 1,82X^{3,14} \exp(-1,85X^{0,92}).$$

#### Висновки та перспективи подальших досліджень

1. На початкових стадіях подрібнення вихідного матеріалу крива розподілу має два характерних максимуми, що відповідають ймовірним розмірам фазових складових: 6 мкм для  $SiO_2$  і 20 мкм для  $Fe_2O_3$ .
2. Отримання внаслідок подрібнення у вібраційному млині протягом 70 год. монодисперсного порошку:  $F(X) = 1,82X^{3,14} \exp(-1,85X^{0,92})$  дозволяє покращити сепарацію після переведення гематиту в магнітний стан.

3. За допомогою теоретичного описання експериментальних кривих розподілу  $F(X) = dN/dX$  проводиться прогнозування розподілу поверхневої площі часток  $F(X) = dS/dX$ , а значить і швидкості протікання відновлювальних реакцій.

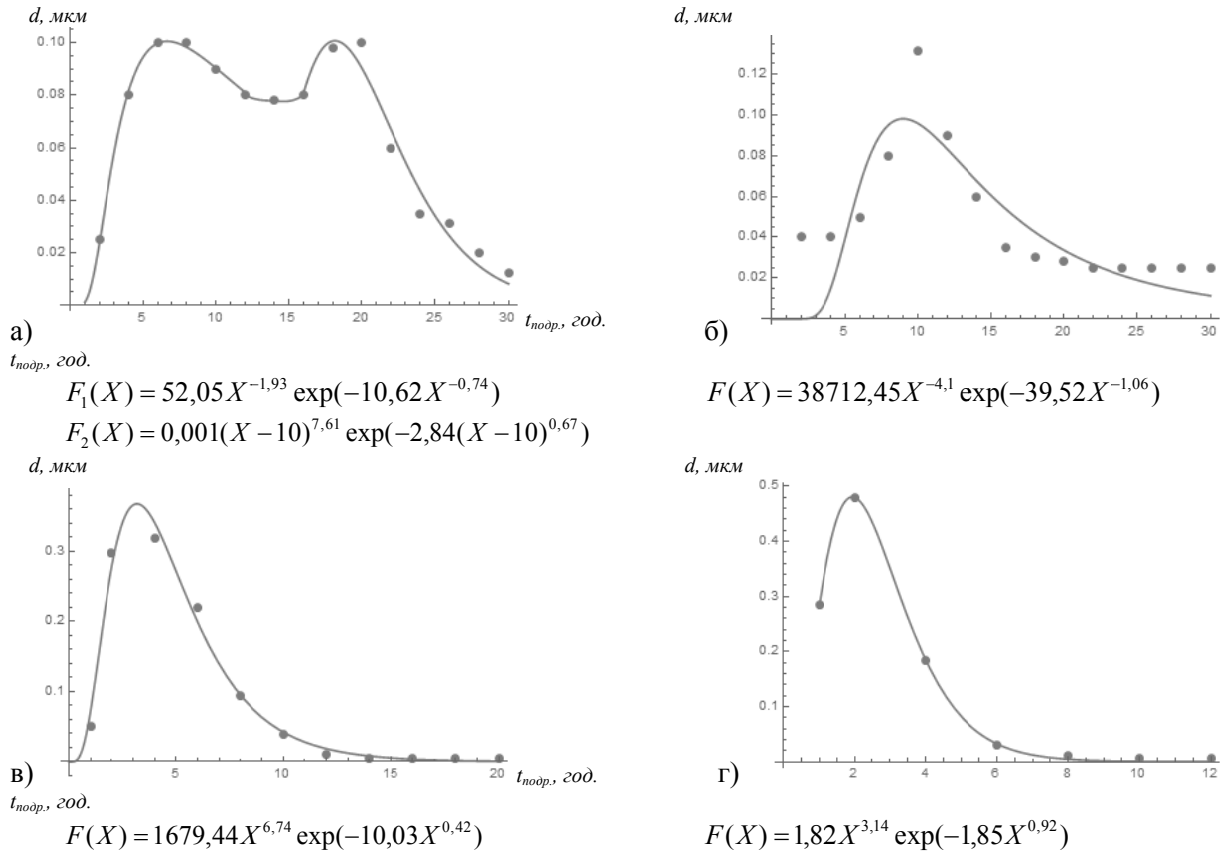


Рис. 3. Теоретичне описання розподілу відносної кількості частинок порошку гематитовмісного матеріалу за їх розмірами в вихідному стані (а) та після подрібнення в вібраційному млині: б) 10 год., в) 40 год., г) 70 год.

### Список використаної літератури

1. Молчанов В.И. Активация минералов. / Молчанов В.И., Селезнева О.Г., Жирнов Е.Н. – М.: Недра, 1988. – 208 с.
2. Аввакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов. / Евгений Григорьевич Аввакумов: [2-е изд., перераб. и доп.] – Новосибирск: Наука, 1979. – 306с.
3. Перспективи використання методів механоактивації для вирішення проблеми утилізації відходів / М.М. Орфанова, Я.М. Семчук // Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. – 2013. – № 5 (82). – С. 160–165.
4. Кінетичні параметри процесу відновлення гематиту до магнетиту за допомогою біомаси / В.П. Пономар, Н.О. Дудченко, О.Б. Крик // Вісник Дніпропетровського університету. Серія: геологія, географія. – 2017. – № 25 (1). – С. 53–62.
5. Ходаков Г.С. Физика измельчения. / Ходаков Г.С. – М.: Наука, 1972. – 308 с. – (Физико-математическая библиотека инженера).

## OPTIMIZATION OF MECHANOACTIVATION PROCESSES BY ANALYSIS OF THE CURVES OF DISTRIBUTION FOR POWDER PARTICLES BY THEIR SIZES Brekharya G.P., Bondar N.P.

### Abstract

Authors of article a study was conducted on predicting the effect of mechanoactivation on the occurrence of regenerative processes  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$ . It is known that the grinding of materials leads to an increase in powder dispersion, but most recently mechanical processing is used to activate physical and chemical processes.

To date, there is a topical way of obtaining pure iron from iron-ore raw materials without a dossier. At the same time, important processes are the disclosure of minerals during shredding and increasing the surface area of particles necessary for a better flow of restorative reactions.

For research was selected hematite ore, the main phase components of which are  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . The iron ore was subjected to milling in a vibrating mill. Based on the results of measurements of the particle size of the powder, were constructed graphs of the distribution of the relative number of particles by their size. The use of the program Wolfram Mathematica allowed mathematically to describe the experimentally constructed graphs. It is known that reducing reactions occur faster with an increase in the surface area of powder particles, but there are problems when measuring this value. Therefore, it is advisable to use the analytical method of the transition from the dependence in  $dN/dX$  to the equation  $dS/dX$ . In this case, the differential equation of distribution is different in terms of power.

The analysis of the obtained curves showed that in the initial stages of shredding the source material, the distribution curve has two characteristic maxima corresponding to the probable dimensions of the phase components:  $6 \mu\text{m}$  for  $\text{SiO}_2$  and  $20 \mu\text{m}$  for  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . The optimum mono-disperse powder was obtained as a result of milling in a vibrating mill for 70 h. This allows for improved separation after the transfer of hematite into a magnetic state.

### References

- [1] Molchanov V., Seleznyova O., and Gironov E. Aktivatsiya mineralov [Activation of minerals]. Moskva, 1988. 208 p.
- [2] Avvakumov E. Mehanicheskie metodi aktivatsii himicheskikh protsesov [Mechanical methods of activation of chemical processes]. Novosibirsk, 1979. 192 p.
- [3] Orfanova M., Semchuk Y. Perspektivi vikoristanya metodiv mehanoaktivatsii dlya virishenya problemi utilizatsii vidhodiv. [Prospects for the use of methods of mechanical activation to solve the problem of waste disposal]. *Visnik KNU im. Mihaila Ostrogradskogo*, 2013, no. 5(82), pp. 160–165.
- [4] Ponomar V., Dudchenko N., Krik O. Kinetichni parametric protsesu vidnovlenya gematitu do magnetite za dopomogoyu biomasi. [Kinetic parameters of the process of hematite to magnetite recovery using biomass]. *Visnik DU. Seriya: geologiya, geographiya*, 2017, no. 25(1), pp. 53–62.
- [5] Hodakov G. Fizika izmelcheniya. [Grind Physics]. Moskva, 1972. 308 p.