

УДК 622.776

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-45>

ВИЗНАЧЕННЯ НЕОБХІДНОЇ КРУПНОСТІ ПОДРІБНЕННЯ РУДИ

Младецький Ігор Костянтинович,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-6159-6819

Левченко Костянтин Анатолійович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0009-0005-6490-8805

Чеберячко Сергій Іванович,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки

Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»,

професор кафедри безпеки праці та охорони довкілля

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-3281-7157

Михайлова Діна Олегівна,

викладач кафедри гірничої справи

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Для досягнення заданої якості концентрату необхідно забезпечити достатнє розкриття матеріалу, а саме задану крупність подрібнення руди перед збагаченням. Тому дана робота присвячена пошуку функціональної залежності між необхідною кінцевою крупністю подрібнення і параметрами руди, яка надходить на збагачення, при умові, що вміст цінного мінералу у концентраті є заданою величиною $\beta_{кз}$, а на його втрати у хвостах накладено обмеження $v_x < v_{хдоп}$.

При виконанні роботи застосовано метод узагальнення наукової інформації, аналітичний, ймовірностатистичний метод дослідження.

В роботі запропонований підхід аналітичного розрахунку параметрів розкриття руди, а саме: кількості розкритих рудних та породних зерен, багатих і бідних зростків, на основі заданих показників збагачення. Також ці показники розраховуються на основі даних щодо середньої крупності подрібнення руди та її технологічних параметрів, основними із яких є вміст цінного компонента α_n та середня крупність вкrapлення цінного мінералу $d_{вк}$. Шляхом порівняння розрахункового значення параметрів розкриття із необхідним (отриманим на попередньому етапі), визначається середня крупність подрібнення руди.

Практична значимість полягає в тому, що запропонований метод дозволяє точно розрахувати, до якого середнього розміру необхідно подрібнити руду, щоб отримати концентрат з бажаними якісними характеристиками, що допоможе уникнути надлишкового її переподрібнення.

Цей підхід може бути використаний на етапі проектування нових збагачувальних фабрик, що забезпечить науково-технічну базу для прийняття рішень, які ґрунтуються на аналітичних розрахунках.

Ключові слова: крупність подрібнення, параметри розкриття руди, крупність вкrapлення, вміст цінного мінералу.

Mladetskyi Ihor, Levchenko Kostiantyn, Cheberiachko Ivan, Mykhailova Dina. Determining the required ore grinding size

To achieve the desired concentrate quality, it is necessary to ensure sufficient opening of the material, namely, the specified ore grinding size before enrichment. Therefore, this work is devoted to finding a functional relationship between the required final grinding size and the parameters of the ore supplied for enrichment, provided that the content of the valuable mineral in the concentrate is a specified value $\beta_{кз}$ and its loss in the tailings is limited by

$v_x < v_{хдоп}$

In carrying out the work, the method of generalization of scientific information, analytical, probabilistic-statistical research methods were used.

The work proposes an approach to the analytical calculation of ore exposure parameters, namely: the number of exposed ore and rock grains, rich and poor grains, based on given enrichment indicators. These indicators are also calculated based on data on the average size of ore grinding and its technological parameters, the main ones being the content of the valuable component α_n and the average size of the valuable mineral inclusion d_{BK} . By comparing the calculated value of the overburden parameters with the required one (obtained at the previous stage), the average size of ore grinding is determined.

The practical significance lies in the fact that the proposed method allows accurately calculating the average size to which the ore must be crushed in order to obtain a concentrate with the desired quality characteristics, which will help avoid excessive over-crushing.

This approach can be used at the design stage of new enrichment plants, providing a scientific and technical basis for making decisions based on analytical calculations.

Key words: grinding size, ore opening parameters, particle size, valuable mineral content.

Проектування збагачувальних технологій для глибокого збагачення вкраплених корисних копалин в першу чергу вимагає визначення кількості стадій подрібнення. Для цього необхідна оцінка початкового і кінцевого значень крупності частинок руди. Початковим значенням крупності частинок для глибокого збагачення є крупність частинок дрібного дроблення, і його оцінка не викликає значних труднощів. Кінцеве значення середньої крупності подрібнення пов'язують з необхідним значенням якості концентрату. Тому для цього спочатку орієнтуються на середню крупність вкраплення цінного мінералу, а потім експериментальними дослідженнями збагачуваності корисної копалини оцінюють остаточне значення середньої крупності подрібнення.

При використанні комп'ютерних технологій в першу чергу необхідно знати функціональну залежність між необхідною кінцевою крупністю подрібнення і параметрами руди, що надходить на збагачення.

Дана робота присвячена пошуку згаданої залежності і вирішується за умови, що якість концентрату є заданою величиною β_K , а на втрати цінного компонента в хвостах накладено обмеження $v_X < v_{X\text{доп}}$. Відомою величиною також є середня крупність вкраплення цінного мінералу d_{BK} і вміст цінного компонента у початковій руді α_n . Пошук залежності будемо вести на прикладі усереднених показників залізних руд Криворізького залізорудного басейну.

У роботі [1] запропоновано формулу, що дозволяє певною мірою прогнозувати якість концентрату β_K , якщо відомі вміст цінного мінералу у початковій руді α_n , показник розкриття R і показник досконалості технології розділення K , тобто

$$\beta_K = \alpha_n + RK(1 - \alpha_n). \quad (1)$$

Коефіцієнти K і R залежать від технології переробки корисної копалини і спільно визначають складність збагачення корисної копалини. Коефіцієнт K визначає досконалість розділення,

і тому пов'язаний з видом сепараційних характеристик апаратів, що застосовуються в технології. Визначимо значення показників, що характеризують технологію збагачення.

Показник досконалості технології розділення залежить від конструктивних та технологічних параметрів сепараторів, що застосовуються, і технології їх з'єднання. Експериментально цей показник може бути визначений за результатами випробування технологічних потоків.

Дослідження фракційного складу твердої фази пульпи хвостів і концентрату показало, що розподіл зростків у цих продуктах має вигляд, наведений у табл. 1. Середнє значення виходу концентрату при цьому складає $\gamma_B = 0,4$.

Таблиця 1
Залежності розподілу зростків у вихідних продуктах збагачувальної фабрики

α	0	0,125	0,375	0,625	0,875	1
F_B	0,01	0,02	0,04	0,09	0,6	1
F_v	0,25	0,8	0,9	0,98	0,99	1

Співвідношення між вузькими фракціями в збагаченому продукті має вигляд:

$$\Delta\gamma_B = \Delta F_B \cdot \gamma_K,$$

а в збідненому

$$\Delta\gamma_v = \Delta F_v \cdot (1 - \gamma_K),$$

де $\Delta\gamma_B$, $\Delta\gamma_v$ – вихід вузької фракції відповідно в збагачений продукт (концентрат) та збіднений (відходи);

ΔF_B , ΔF_v – вміст цієї ж вузької фракції відповідно в збагаченому та збідненому продукті;

γ_K – вихід концентрату.

Баланс вузьких фракцій в продуктах розділення визначається за виразом:

$$\Delta\gamma_\alpha = \Delta\gamma_v + \Delta\gamma_B.$$

Відповідно до визначення, сепараційна характеристика представляє собою відношення вмісту фракції в концентраті до вмісту цієї ж фракції в початковому продукті, тобто:

Таблиця 2

Сепараційна характеристика технологічної лінії збагачення

Вміст цінного мінералу, α	0	0,125	0,375	0,625	0,875	1
Ймовірність вилучення, P	0,0024	0,012	0,15	0,29	0,97	0,98

$$P = \frac{\Delta\gamma_{\beta}}{\Delta\gamma_{\alpha}} = \frac{\Delta F_{\beta} \cdot \gamma_K}{\Delta F_{\beta} \cdot \gamma + \Delta F_v \cdot (1 - \gamma_K)}. \quad (2)$$

В результаті отримано сепараційну характеристику технологічної лінії збагачення, яка наведена в табл. 2.

Як видно із табл.2, сепараційна характеристика близька до ідеальної. Тому можна припустити, що розділення відбувається ступінчасто при значенні $\alpha = \alpha_{\Pi}$ і коефіцієнт досконалості технології розділення на цій підставі $K = 1$.

Таким чином, вихідний вираз (1) набуває наступного вигляду:

$$\beta_{K3} = \alpha_{\Pi} + R \cdot (1 - \alpha_{\Pi}). \quad (3)$$

З останнього співвідношення визначається необхідне розкриття для досягнення бажаної якості концентрату:

$$R_T = \frac{\beta_{K3} - \alpha_{\Pi}}{1 - \alpha_{\Pi}}. \quad (4)$$

На підставі вимог до якості концентрату і втрат цінного мінералу в хвостах можна визначити вихід концентрату за виразом:

$$\gamma_T = \frac{\alpha_{\Pi} - v_{\text{хдоп}}}{\beta_{K3} - v_{\text{хдоп}}}. \quad (5)$$

Показник розкриття визначиться, як різниця між вмістом цінного мінералу в рудній та нерудній частині [2]. Нагадуємо, що рудна частина складається із розкритих рудних зерен P_P та багатих зростків P_{P3} , а нерудна частина – із розкритих породних зерен P_H і бідних зростків P_{H3} . Ці показники являються параметрами розкриття.

Тоді показник розкриття можна визначити за виразом:

$$R = \alpha_P - \alpha_H = \frac{P_P + P_{P3} \cdot \alpha_{P3}}{P_P + P_{P3}} - \frac{P_{H3} \cdot \alpha_{H3}}{P_H + P_{H3}}, \quad (6)$$

де α_{P3} – вмістом цінного мінералу в багатих зростках, $\alpha_{P3} = \frac{1 + \alpha_{\Pi}}{2}$;

α_{H3} – вмістом цінного мінералу в бідних зростках, $\alpha_{H3} = \frac{\alpha_{\Pi}}{2}$.

За сформульованих умов розділення, можна припустити, що концентрат повинен складатися із розкритих рудних зерен та багатих зростків, а відходи навпаки – із розкритих породних

зерен бідних зростків. Тоді вихід концентрату можна визначити, як:

$$\gamma_T = P_P + P_{P3}, \quad \text{та} \quad 1 - \gamma_T = P_H + P_{H3}, \quad (7)$$

тоді, відповідно:

$$\alpha_P = \beta_{K3}, \quad \text{і} \quad \alpha_H = v_{\text{доп}}. \quad (8)$$

Використовуючи співвідношення (6)...(8), запишемо:

$$v_{\text{хдоп}} = \frac{P_{H3} \cdot \alpha_{H3}}{1 - \gamma_T},$$

звідки

$$P_{H3} = \frac{(1 - \gamma_T) v_{\text{хдоп}}}{\alpha_{H3}}. \quad (9)$$

А також із вказаних співвідношень виходить:

$$\frac{P_P + P_{P3} \cdot \alpha_{P3}}{\gamma_T} = \beta_{K3},$$

звідки

$$P_{P3} = \frac{2\gamma_T(1 - \beta_{K3})}{1 - \alpha_{\Pi}}. \quad (10)$$

Вміст відкритих фракцій складе:

$$P_P = \alpha_{\Pi} - P_{P3}; \quad P_H = 1 - \alpha_{\Pi} - P_{H3}; \quad (11)$$

Визначимо необхідні показники розкриття за наступних початкових даних:

$$\alpha_{\Pi} = 0,4; \quad \beta_{K3} = 0,95; \quad v_{\text{хдоп}} = 0,05; \quad \alpha_{H3} = 0,2; \\ \alpha_{P3} = 0,7.$$

Показники розкриття наступні:

– вихід концентрату

$$\gamma_T = \frac{\alpha_{\Pi} - v_{\text{хдоп}}}{\beta_{K3} - v_{\text{хдоп}}} = \frac{0,4 - 0,05}{0,95 - 0,05} = 0,389;$$

– кількість бідних зростків

$$P_{H3} = \frac{(1 - \gamma_T) v_{\text{хдоп}}}{\alpha_{H3}} = \frac{(1 - 0,389) 0,05}{0,2} = 0,153;$$

– кількість розкритих породних зерен

$$P_H = 1 - 0,4 - 0,153 = 0,444;$$

– кількість багатих зростків

$$P_{P3} = \frac{2\gamma_T(1 - \beta_{K3})}{1 - \alpha_{\Pi}} = \frac{2 \cdot 0,389(1 - 0,95)}{1 - 0,4} = 0,065;$$

– кількість розкритих рудних зерен

$$P_p = \alpha_{\Pi} - P_{P3} = 0,4 - 0,065 = 0,335.$$

Обчислений за цими даними показник розкриття складає:

$$R = \frac{P_p + P_{P3} \cdot \alpha_{P3}}{P_p + P_{P3}} - \frac{P_{H3} \cdot \alpha_{H3}}{P_H + P_{H3}} = \frac{0,335 + 0,065 \cdot 0,7}{0,335 + 0,065} - \frac{0,153 \cdot 0,2}{0,444 + 0,153} = 0,9.$$

В наступному, для визначення необхідної крупності подрібнення виберемо одне з рівнянь для розрахунку параметрів розкриття, наприклад кількість розкритих рудних зерен [3]:

$$P_p = \frac{\alpha_{\Pi}}{d} \int_0^{d_{BK}} \left(1 - \frac{d}{d_{BK}}\right) \exp\left(-\frac{d}{d}\right) dd,$$

і за його допомогою визначимо середню крупність подрібнення. З цією метою спростимо інтегральне вираз, представивши його кінцевою сумою [4]:

$$P_p = \alpha_{\Pi} \sum_{i=1}^k \left(1 - \frac{d}{d_{BK}}\right) \left(\exp\left(-\frac{d_{i+1}}{d}\right) - \exp\left(-\frac{d_i}{d}\right)\right),$$

де d_{BK} – розмір вкраплення цінного мінералу;

$\bar{d}$ – середня крупність подрібнення.

Для виконання аналітичних розрахунків приймемо закон розподілу частинок за крупністю однопараметричним.

Задаючи значення середньої крупності подрібнення обчислимо кількість відкритих

рудних зерен, та шляхом порівняння його з необхідним, розрахованим раніше, визначимо необхідну крупність подрібнення руди.

Якщо прийняти значення середньої крупності вкраплення $d_{BK} = 0,2$ мм, отримаємо:

– для $\bar{d} = 0,2$ мм, $P_p = 0,13$;

– для $\bar{d} = 0,1$ мм, $P_p = 0,27$;

– для $\bar{d} = 0,03$ мм, $P_p = 0,33$.

Останнє значення вмісту відкритих рудних зерен відповідає отриманому раніше, а отже задачу вирішено.

Необхідна середня крупність подрібнення руди становить 0,03 мм. При цьому вміст класу – 0,07 мм становить:

$$P_{-0,07} = 1 - \exp\left(-\frac{0,07}{0,03}\right) = 0,903.$$

Таким чином, для отримання необхідних показників якості концентрату необхідно подрібнювати руду, в якій вміст цінного компонента 40 % і його вкраплення 0,2 мм до вмісту 90 % класу – 0,07 мм, що відповідає показникам подрібнення для залізної руди середньої збагачуваності.

Висновки. Для теоретичного визначення необхідної крупності подрібнення руди необхідно знати середнє значення вкраплення цінного мінералу у руді, та його вміст у концентраті та відходах.

Наведено методику визначення необхідної крупності подрібнення руди.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Пілов П. І. Проектування збагачувальних фабрик залізних руд: навч. посіб. Дніпро : Пороги, 2021. 239 с.
2. Младецький І. К., Пілов П. І. Технологічні розрахунки показників збагачення корисних копалин: навч. посіб. Д. : НГУ, 2005. 156 с.
3. Младецький І. К., Пілов П. І., Левченко К. А., Куваєв Я. Г. Випробування і контроль процесів збагачення корисних копалин: навч. посіб. Дніпро : Журфонд, 2019. 204 с.
4. Синтез технологій збагачення корисних копалин / І. К. Младецький та ін. Дніпро : Журфонд, 2023. 137 с.

REFERENCES:

1. Pilov, P. I. (2021). Proektuvannia zbahachuvalnykh fabryk zaliznykh rud [Design of iron ore beneficiation plants], Dnipro : Porohy. [in Ukrainian].
2. Mladetskyi, I. K., & Pilov, P. I. (2005). Tekhnolohichni rozrakhunky pokaznykiv zbahachennia korysnykh kopalyn [Technological calculations of mineral processing indicators], D. : NHU. [in Ukrainian].
3. Mladetskyi, I. K., Pylov, P. I., Levchenko, K. A., & Kuvaiev, Ya. H. (2019). Vyprobuvannia i kontrol protsesiv zbahachennia korysnykh kopalyn [Testing and control of mineral processing processes]. Dnipro : Zhurfond. [in Ukrainian].
4. Mladetskyi, I. K., Levchenko, K. A., Dreshpak, O. S., Bereznia, O. O., & Mediany, V. Yu. (2023). Syntez tekhnolohii zbahachennia korysnykh kopalyn [Synthesis of mineral processing technologies], Dnipro : Zhurfond. [in Ukrainian].