

4. Отработка Ингулецкого месторождения карьером ЧАО «ИнГОК» в границах лицензионной площади. Открытые горные работы: проект / ГП «ГПИ «Кривбасспроект»; ГИП Ковалёв К.В. – Кривой Рог, 2016. – 209 с.
5. Технично-економическое обоснование целесообразности завершения строительства Криворожского горно-обогатительного комбината окисленных руд: проект / ГП «ГПИ «Кривбасспроект»; ГИП Биленко А.Е. – Кривой Рог, 2015. – 197 с.
6. Трубецкой К.Н., Шапарь А.Г. Малоотходные и ресурсосберегающие технологии при открытой разработке месторождений. – М.: «Недра», 1993. – 272 с.
7. Григор'єв І.Є. Визначення основних методичних принципів ціленаправленого формування техногенних родовищ при комплексному освоєнні надр / Григор'єв І.Є., Григор'єв Ю.І., Усачов В.Е., Євтушенко М.С. // Зб. наук. праць НГУ, 2019. – Вип. 56. – С. 18–28.
8. Трубецкой К.Н., Воробьёв А.Е. Основы ресурсовоспроизводящих технологий складирования и хранения некондиционного минерального сырья // Горный журнал, 1995.– Вип. №5. – С 47-51.
9. Григорьев И.Е., Григорьев Ю.И. Системный подход к процессу проектирования горных объектов // Разраб. рудн. месторожд., 2011. – Вип. №94. – С 40-44.
10. Кармазин В.В., Пак С.Г., Маслов Д.С. Магнитное обогащение окисленных железистых кварцитов Михайловского железорудного месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2012, с 212-219.

УДК 658.652.64.622.3

А.А. АЗАРЯН, В.А. АЗАРЯН, В.С. МОРКУН, доктори техн. наук, проф.,  
А.М. ГРИЦЕНКО, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.,  
А.А. ТРАЧУК, канд. техн. наук, доц., Криворізький національний університет

## ОПЕРАТИВНИЙ КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ РУД ЧОРНИХ МЕТАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ

**Мета.** Для підвищення точності визначення вмісту корисного компоненту в рудах чорних металів гамма-гамма методом необхідно розробити математичну модель взаємодії гамма-випромінювання з зразками руд чорних металів та геометричних параметрів зони вимірювання (габаритів колімаційного отвору, розміщення джерела низько-енергетичного гамма-випромінювання одне відносно одного а також відстані до поверхні досліджуваного зразка) та вмісту суміжних компонентів, що входять до складу руд.

**Методи досліджень.** Для досягнення сформульованої мети застосовано комплексний метод досліджень, що включає в себе теоретичні й інструментальні методи: аналіз вітчизняних та зарубіжних джерел, планування експериментів, математична обробка результатів, аналіз речовинного складу руд, теоретичні узагальнення з використанням теорії взаємодії гамма-випромінювання з гірськими породами, методи математичного, імітаційного та комп'ютерного моделювання, експериментальні дослідження в лабораторних умовах.

**Наукова новизна.** В результаті досліджень отримав подальшого розвитку метод математичного моделювання теоретичного визначення величини інтенсивності гамма-випромінювання як функції, що залежить від геометричних параметрів зони вимірювання та речовинного складу досліджуваного зразка. Визначено масові коефіцієнти ослаблення для різного вмісту корисного компоненту.

**Практична значимість** Отримані аналітичних вирази доцільно використовувати при проектуванні засобів оперативного визначення вмісту корисних компонентів для визначення оптимальних розмірів зони вимірювання.

**Результати** На основі законів взаємодії гамма-випромінювання з гірськими породами побудовано математичну модель розрахунку величини потоку розсіяного гамма-випромінювання, яка дозволяє врахувати особливості зони вимірювання. Адекватність отриманої моделі доведено задовільним збігом експериментальних даних з розрахунковими.

**Ключові слова:** математична модель, інтенсивність випромінювання, центральна геометрія, взаємодія випромінювання, вміст заліза, коефіцієнти ослаблення, некогерентне випромінювання, хромові руди.

doi:10.31721/2306-5435-2022-1-110-13-22

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** До руд чорних металів відносяться залізни, хромові, марганцеві та ванадієві.

Для визначення вмісту корисного компонента в руді з використанням гамма-випромінювання застосовується центральна та бічна геометрія взаємного розташування джерела гамма-випромінювання та детектора. Для забезпечення високої точності оперативного контролю якості мінеральної сировини пристроями реєструється інтенсивність інтегрального потоку розсіяного гамма-випромінювання, що залежить як від речовинного складу руди так і від параметрів пристрою. Для визначення цих впливів присвячено дану роботу.

**Аналіз досліджень та публікації.** Використання низько-енергетичного (менше 100 кеВ) гамма-випромінювання в методі розсіяного гамма-випромінювання визначає інтегральний параметр - ефективний атомний номер аналізованого матеріалу [1] Для багатьох гірських порід та руд квазібінарного складу спостерігається досить тісна кореляційна залежність між ефективним атомним номером і вмістом найважчого компонента, яким є, наприклад, залізо в залізних рудах, мінеральні домішки (зольність) у вугіллі, кальцій у карбонатній сировині. Зазначені кореляційні залежності широко використовуються в дослідженнях при інструментальному визначенні зольності вугілля, контролю вмісту заліза в рудах, аналізі карбонатної сировини на кальцій та ін. [1-4].

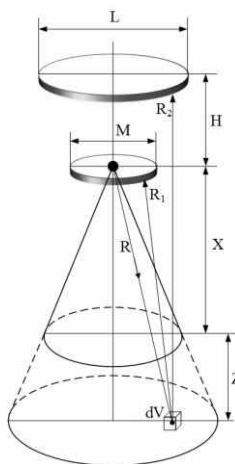
Суттєвими факторами, що знижують точність інструментального методу розсіяного гамма-випромінювання, є неоднорідність (низька гетерогенність) досліджуваного матеріалу [2]. Доведено, що похибка за рахунок неоднорідності, зумовленої нерівномірним розподілом частинок певного компонента у вимірювальному обсязі [5], неоднорідність гамма-послаблюючих властивостей аналізованого матеріалу, гранулометричного складу, щільності [6], мінливості геометричних параметрів вимірювальної зони [7-8]. Вказані фактори тією чи іншою мірою впливають на флуктуацію вимірюваної інтенсивності розсіяного гамма-випромінювання, що призводить до похибки інструментального методу розсіяного гамма-випромінювання.

**Постановка задачі.** Одним з шляхів підвищення точності пристроїв оперативного контролю якості залізорудної сировини, що базується на використанні результатів взаємодії гамма-випромінювання з гірською масою є оптимізація геометрії вимірювального вузла а також врахування впливу речовинного складу. Для цього необхідно розробити математичну модель що враховує процеси розповсюдження та взаємодії гамма-випромінювання, а також геометричні параметри зони вимірювання. Перевірити адекватність розробленої моделі експериментами.

**Викладення матеріалу та результати.** Розглянемо моделювання процесу за центральної геометрії.

Математичне моделювання центральної геометрії виконується у два етапи. На першому етапі, виходячи із законів взаємодії гамма-випромінювання з речовиною, будується модель, що дозволяє отримати якісні особливості залежності інтенсивності потоку розсіяного гамма-випромінювання від геометричних та ядерно-фізичних факторів, на другому етапі вирішується завдання побудови емпіричної моделі, з одного боку, що правильно описує якісний характер знайдених на етапі залежностей, а з іншого боку, містить числові параметри, за допомогою яких можливо домогтися необхідного кількісного збігу експериментальних та розрахункових даних. Такий процес, що включає два етапи моделювання, пояснюється тим, що моделі, побудовані на основі теоретичних відомостей про закони взаємодії гамма-випромінювання з речовиною, мають складний характер, і обчислення за ними можуть бути доведені до кінця лише при припущеннях, що спрощують. Зрештою, це приводить лише до можливості якісного аналізу залежностей. Отримані моделі є опорними для створення наступних емпіричних моделей, які правильно описують якісні й кількісні залежності.

Завдання математичного моделювання аналізованого методу контролю на першому етапі полягає у визначенні величини потоку вторинного гамма-випромінювання як функції, що залежить від геометричних параметрів зони вимірювання та фізичних властивостей руди [9]. Схема вузла виміру представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схематичне зображення геометрії вузла вимірювання потоку вторинного гамма-випромінювання при наближенні одноразового розсіювання

Згідно зі схемою (рис. 1), джерело та детектор знаходяться по одну сторону від досліджуваного зразка в конфігурації центральної геометрії, реалізуючи вимір «на відображення» гамма-випромінювання. На першому етапі при створенні математичної моделі для спрощення розрахунків доцільно припустити, що джерело гамма-випромінювання є точковим і знаходиться у вершині конічного коліматора, вісь якого перпендикулярна поверхні досліджуваного зразка.

Нехай на поверхню досліджуваного зразка нормально падає когерентний пучок гамма-променів, що випускається джерелом  $Q$ , розташованим у контейнері діаметром  $M$ , що знаходиться на відстані  $X$  від проби та на відстані  $H$  від детектора, що має діаметр вікна  $L$ . Число вторинних гамма-квантів, що вини-

кають в обсязі  $dV$ , що містить точку  $C$ , в результаті взаємодії первинного гамма-випромінювання джерела  $Q$  з речовиною зразка і досягнули детектора  $A$ , визначається за формулою (1)

$$d\Pi_{\delta}^{(1)} = \frac{Q_0 K_{\delta} \rho}{4\pi R_1^2 R_2^2} \cdot \exp(-\rho(\mu_j r_1 + \mu_{\delta} r_1)) \cdot dV, \quad (1)$$

де  $Q_0$  - активність джерела;  $R_1, R_2$  - відстань від елементарного об'єму  $dV$  до джерела та детектора, відповідно;  $r_1, r_2$  - відстані, що проходять у пробі первинним та вторинним гамма-випромінюванням, відповідно;  $\mu_j, \mu_{\delta}$  - масові коефіцієнти ослаблення первинного та вторинного гамма-випромінювання;  $K_{\delta}$  - коефіцієнт перетворення первинного гамма-випромінювання у вторинне;  $\rho$  - щільність досліджуваного зразка;  $L$  - діаметр монокристалу що реєструє розсіяного гамма-випромінювання,  $M$  - діаметр захисного контейнера всередині якого розміщено джерело гамма-випромінювання,  $dV$ -досліджуваний зразок руди.

Беручи до уваги, що кут  $\alpha$  при вершині кінцевого коліматора джерела малий в циліндричній системі координат  $(r, \varphi, z)$ , початок якої розташовано на поверхні проби, а вісь  $Z$  збігається з віссю коліматора, то вираз (1) набуває вигляду

$$d\Pi_{\delta}^{(1)} = \frac{Q_0 K_{\delta}(Z) \rho}{4\pi(X+Z)^2(H+X+Z)^2} \cdot l^{-\rho(\mu_j + \mu_{\delta})Z} \cdot rd \varphi dZ. \quad (2)$$

Інтегруючи (2), отримуємо вираз, що визначає щільність потоку вторинного гамма-випромінювання на поверхні детектора без урахування екранування потоку контейнером джерела

$$\Pi_{\delta}^{(1)} = \frac{Q_0 t g^2 \frac{\alpha}{2} \cdot \rho d}{4} \int_0^d \frac{K_{\delta}(Z)}{(H+X+Z)^2} l^{-\rho(\mu_j + \mu_{\delta})Z} \cdot dZ,$$

де  $d$  - товщина гірської маси (зразка).

Потік вторинного гамма-випромінювання, який досяг детектора, не враховуючи екранування контейнером джерела, визначається за виразом

$$N_{\delta}^{(1)} = \Pi_{\delta}^{(1)} \cdot \frac{\pi L^2}{4} = \frac{Q_0 t g^2 \frac{\alpha}{2} \cdot \rho \pi L^2 d}{16} \int_0^d \frac{K_{\delta}(Z)}{(H+X+Z)^2} \cdot l^{-\rho(\mu_j + \mu_{\delta})Z} \cdot dZ, \quad (3)$$

де  $l$  - діаметр вікна детектора.

Аналогічним чином, потік вторинного гамма-випромінювання що затримується контейнером джерела, визначається за виразом

$$N_{\delta}^{(2)} = \frac{Q_0 t g^2 \frac{\alpha}{2} \cdot \rho \pi M^2 d}{16} \int_0^d \frac{K_{\delta}(Z)}{(X+Z)^2} l^{-\rho(\mu_j + \mu_{\delta})Z} \cdot dZ. \quad (4)$$

Таким чином, потік вторинного гамма-випромінювання, з урахуванням екранування контейнером джерела, визначається як різниця виразів (3) та (4)

$$N_{\delta} = N_{\delta}^{(1)} - N_{\delta}^{(2)} = \frac{\pi}{16} Q_0 t g^2 \frac{\alpha}{2} \int_0^d K_{\delta}(Z) \cdot \left( \frac{L^2}{(H+X+Z)^2} - \frac{M^2}{(X+Z)^2} \right) \cdot \exp(-\rho(\mu_j + \mu_{\delta})Z) dZ. \quad (5)$$

Вираз (5) може бути спрощений, використовуючи той факт, що для ядерно-фізичного аналізу в довгохвильовій області спектра глибина проникнення  $Z$  первинного випромінювання набагато менше, ніж відстань  $X$  від джерела до поверхні зразка і набагато менше зразка товщиною  $d$ . Беручи це до уваги в (5)  $Z \ll X$  та  $Z \ll d$  і враховуючи, що в цьому випадку  $K_{\delta}$  і  $M_{\delta}$  можна вважати незалежними від  $Z$  отримуємо

$$N_{\delta} = \frac{\pi}{16} Q_0 t g^2 \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{K_{\delta}}{\mu_j + \mu_{\delta}} \left( \frac{L^2}{(H+X)^2} - \frac{M^2}{X^2} \right). \quad (6)$$

Оскільки потік вторинного гамма-випромінювання включає три типи гамма-випромінювання, відповідно їх сума

$$N = \sum_{\delta=1}^3 N_{\delta} = \frac{\pi}{16} Q_0 \cdot t g^2 \frac{\alpha}{2} \left( \frac{L^2}{(H+X)^2} - \frac{M^2}{X^2} \right) \sum_{\delta=1}^3 \frac{K_{\delta}}{\mu_j + \mu_{\delta}}. \quad (7)$$

Якщо джерело гамма-випромінювання не когерентне, то у виразі (7) необхідно враховувати залежність  $K_\delta$ ,  $\mu_j$  та  $\mu_\delta$  від енергії гамма-випромінювання, тому вираз (7) прийме форму

$$N = \frac{\pi}{16} Q_0 t g^2 \frac{\alpha}{2} \left( \frac{L^2}{(H+X)^2} - \frac{M^2}{X^2} \right) \sum_{i=1}^n \sum_{\delta=1}^3 \frac{\varepsilon_i K_\delta^{(i)}}{\mu_j^{(i)} + \mu_\delta^{(i)}}, \quad (8)$$

де  $K_\delta^{(i)}$ ,  $\mu_j^{(i)}$  та  $\mu_\delta^{(i)}$  - ядерно-фізичні константи ядерних досліджуваного зразка, що відповідають енергії  $E_i$  джерела гамма-випромінювання.  $\varepsilon_i$  – вихід гамма-випромінювання джерела з енергією  $E_i$ .

Оскільки досліджуваний зразок є багатокомпонентним, розрахунки ядерно-фізичних констант повинні проводитися з урахуванням концентрації складових компонентів.

Отже, загальний масовий коефіцієнт ослаблення визначається за формулою [2]

$$\mu_j^{(i)} = \sum_{K=1}^l \mu_{jK}^{(i)} q_K, \quad (9)$$

де  $\mu_{jK}^{(i)}$  - повний масовий коефіцієнт ослаблення  $K$ -ї компоненти зразка для енергії  $E_i$  джерела гамма-випромінювання;  $q_K$  - концентрація  $K$ -ї компоненти у досліджуваному зразку.

Коефіцієнт трансформації первинного гамма-випромінювання в вторинне для  $K$ -ї компоненти зразка у випадку когерентного розсіювання має вигляд

$$K_{1K}^{(i)} = 2,37 \pi r_0^2 A_0 \frac{1}{E_i^3} \cdot \frac{1 + \cos^2 \theta}{\sin^3 \frac{\theta}{2}} \cdot \frac{Z_K^3}{A_K}, \quad (10)$$

де  $r_0$  - класичний електронний радіус;  $A_0$  - число Авогадро;  $\theta$  - кут розсіювання;  $E_i$  - енергія джерела гамма-випромінювання;  $Z_K$ ,  $A_K$  - атомний номер та атомна вага  $K$ -ї компоненти зразка.

Коефіцієнт трансформації первинного гамма-випромінювання в вторинне  $K$ -ї компоненти зразка у випадку некогерентного розсіювання визначається за виразом

$$K_{2K}^{(i)} = \frac{A_0 r_0^2}{2} \cdot \frac{1}{(1 + \omega_0(1 - \cos \theta))^2} \cdot \left( 1 + \cos^2 \theta + \frac{\omega_0^2 (1 - \cos \theta)^2}{1 + \omega_0(1 - \cos \theta)} \right) \frac{Z_K}{A_K}, \quad (11)$$

де  $\omega_0 = E_i / (m_0 C^2)$  - енергія гамма-кванту в одиницях енергії спокою електрона;  $m_0$  - маса спокою електрона;  $C$  - швидкість світла; (інші позначення мають той самий сенс, що й у виразі (10)).

Коефіцієнт перетворення первинного гамма-випромінювання у вторинне для  $K$ -ї компоненти досліджуваного зразка, у разі порушення характеристичного рентгенівського випромінювання має вигляд

$$K_{3K}^{(i)} = \frac{8\sqrt{2}}{3} \frac{\alpha^4 r_0^2}{\omega_0^{3,5}} A_0 \frac{2\pi \xi l^{-4\xi \operatorname{arctg} \xi}}{\sqrt{1 + \xi^2 (1 - l^{-2\pi \xi})}} \frac{Z_K^5}{A_K}, \quad (12)$$

де  $\alpha = 1/137$  - постійна тонка структура;  $\xi = \sqrt{U_K / (E_i - U_K)}$ ;  $U_K$  - енергія  $K$ -рівня, у якому відбувається поглинання гамма-кванта; (інші позначення відповідно прийнятим у виразах (10) і (11)). При цьому масові коефіцієнти ослаблення вторинного гамма-випромінювання знаходяться для енергій, що відповідають цьому випромінюванню. Так, при когерентному розсіюванні енергія гамма-випромінювання не змінюється, тому

$$\mu_{1K}^{(i)} = \mu_{jK}^{(i)} \quad (13)$$

При некогерентному розсіюванні енергія вторинного гамма-випромінювання визначається за виразом

$$E_i^{\text{розс}} = \frac{E_i}{1 + \omega_0(1 - \cos \theta)} \quad (14)$$

Енергія  $E_i^{\text{розс}}$  визначає величину масового коефіцієнта ослаблення вторинного гамма-випромінювання при некогерентному розсіюванні

$$\mu_{2K}^{(i)} = \mu_{2k}(E_i^{\text{розс}}) \quad (15)$$

При фотоелектричному поглинанні гамма-випромінювання енергія вторинного гамма-випромінювання визначається величиною енергії характеристичного рентгенівського випромінювання  $E_r$ ,

$$\mu_{3Kr}^{(i)} = \mu_{3K}^{(i)}(E_r).$$

Враховуючи багатокомпонентний склад проби повний масовий коефіцієнт ослаблення при  $E=E_r$  визначиться за виразом

$$\mu_{3r}^{(i)} = \sum_{K=1}^l \mu_{3Kr}^{(i)} q_K. \quad (16)$$

Таким чином, з урахуванням багатокомпонентного складу досліджуваного зразка вираз (8) набуває вигляду

$$N = \frac{\pi}{16} Q_0 t g^2 \frac{\alpha}{2} \left( \frac{L^2}{(H+X)^2} - \frac{M^2}{X^2} \right) \sum_{i=1}^n \sum_{K=1}^l \left( \sum_{\delta=1}^2 \frac{K_{\delta K}^{(i)}}{\mu_j^{(i)} + \mu_{\delta K}^{(i)}} + \sum_{r=1}^l \frac{K_{3K}^{(i)}}{\mu_j^{(i)} + \mu_{3r}^{(i)}} \right) q_K \varepsilon_i, \quad (17)$$

де  $K_{\delta K}^{(i)}, \mu_j^{(i)}, \mu_{\delta K}^{(i)}, \mu_{3r}^{(i)}$  - розраховуються за виразами (9) - (16).

Вираз (17) можна подати у вигляді добутку множників, один з яких залежить від ядерно-фізичних характеристик досліджуваної проби, а інший - від геометрії вимірювання

$$N = \frac{\pi}{16} Q_0 t g^2 \frac{\alpha}{2} \varphi_1 \cdot \varphi_2,$$

$$\text{де } \varphi_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{K=1}^l \left( \sum_{\delta=1}^2 \left( K_{\delta K}^{(i)} / (\mu_j^{(i)} + \mu_{\delta K}^{(i)}) \right) + \sum_{r=1}^l \left( K_{3K}^{(i)} / (\mu_j^{(i)} + \mu_{3r}^{(i)}) \right) \right) q_K \varepsilon_i; \quad \varphi_2 = L^2 / (H+X)^2 - M^2 / X^2. \quad (18)$$

Прирівнюючи до нуля вираз (18) і вирішуючи це рівняння щодо  $X$ , визначаємо відстань джерела від поверхні досліджуваного зразка, починаючи з якого вторинне гамма-випромінювання досягає детектора

$$X_0 = H / (L/M - 1) \quad (19)$$

Прирівнюючи похідну до нуля по  $X$  залежність (18), знаходимо відстань джерела від поверхні проби, при якому потік вторинного гамма-випромінювання максимальний

$$X_1 = H / ((L/M) - 1). \quad (20)$$

Вираз (17) дозволяє проводити якісний аналіз основних залежностей при ядерно-фізичному методі контролю речовинного складу руд.

Переходимо до другого етапу моделювання - створення емпіричної моделі. Взввши за опорні точки  $X_0$ ,  $X$  і  $X_1$  (див. формули (17) і (18)) як результат експериментів, емпіричну модель можна представити у вигляді

$$N = \tilde{N}(X_1) \left( \frac{X_1}{X} \left( \ln \frac{X}{X_0} / \ln \frac{X_1}{X_0} \right)^{\ln \frac{X_1}{X_0}} \right)^\mu, \quad (21)$$

де  $N$  - величина інтенсивності потоку вторинного гамма-випромінювання;

$$X_0 = aH / \left( \frac{L}{M} - 1 \right), \quad (22)$$

$$X = bH / \left( \left( \frac{L}{M} \right)^{2/3} - 1 \right), \quad (23)$$

$$\tilde{N}(X_1) = C Q_0 t g^2 \frac{\alpha}{2} \left[ \left( L^{2/3} - M^{2/3} \right)^2 \cdot \left( L^{2/3} + M^{2/3} \right) / H^2 \right], \quad (24)$$

де  $a, b, C, \mu$  - параметри, що є функціями вмісту корисного компонента  $q$ .

Параметри  $a, b$  вибираються так, щоб експериментальні значення  $X_0, X_1$  та  $\tilde{N}(X_1)$  збігалися з розрахованими за формулами (22)-(24). Параметр  $\mu$  вибирається так, щоб величина потоку вторинного гамма-випромінювання у певній точці  $X_2$  ( $X_2 > X_1$ ) збігалася з експериментальним значенням потоку у цій же точці

$$\mu = \ln \frac{\tilde{N}(X_2)}{\tilde{N}(X_1)} / \ln \left( \frac{X_1}{X_2} \left( \ln \frac{X_2}{X_0} / \ln \frac{X_1}{X_0} \right)^{\ln \frac{X_1}{X_0}} \right), \quad (25)$$

де  $\tilde{N}(X_2)$  - величина потоку вторинного гамма-випромінювання коли  $X=X_1$ .

Користуючись отриманими формулами, було проведено розрахунки величини потоку вторинного гамма-випромінювання при опроміненні джерелом Ам-241 зразків хромової руди. При розрахунку приймалося, що джерело випромінює гамма-кванта двох енергій 60 кеВ та 20 кеВ з виходами 40 % та 60 %, відповідно.

В табл. 1 наведено вихідні дані для розрахунку ядерно-фізичних характеристик хромової руди.

Результати розрахунку повних масових коефіцієнтів ослаблення для складів хромової руди та даних табл. 1 представлено у табл. 2.

Таблиця 1

Ядерно-фізичні характеристики хромової руди

| Характеристика                   | Компонент |       |      |      |       |                |
|----------------------------------|-----------|-------|------|------|-------|----------------|
|                                  | Cr        | Si    | Fe   | Al   | Mg    | O <sub>2</sub> |
| Атомна вага, $A_K$               | 52        | 28    | 56   | 27   | 24    | 16             |
| Атомний заряд, $Z_K$             | 24        | 14    | 26   | 13   | 12    | 8              |
| $\mu_{ik}(E_1 = 60 \text{ кеВ})$ | 0,948     | 0,313 | 1,19 | 0,27 | 0,253 | 0,189          |
| $\mu_{ik}(E_1 = 20 \text{ кеВ})$ | 19,9      | 4,42  | 24,9 | 3,41 | 2,72  | 0,817          |

Таблиця 2

Повні масові коефіцієнти ослаблення для різних складів хромової руди

| Характеристика                  | Номер досліджуваного зразка хромової руди |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                 | 1   | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    |
| Концентрація Cr                 | 0   | 0,04  | 0,1   | 0,16  | 0,22  | 0,27  | 0,33  | 0,39  | 0,45  | 0,51  | 0,56  |
| $\mu_i^1(E_1 = 60 \text{ кеВ})$ | 0,305                                     | 0,342 | 0,392 | 0,438 | 0,489 | 0,532 | 0,58  | 0,629 | 0,679 | 0,730 | 0,769 |
| $\mu_i^2(E_2 = 20 \text{ кеВ})$ | 3,944                                     | 4,845 | 6,088 | 7,220 | 8,473 | 9,526 | 10,71 | 11,90 | 13,12 | 14,36 | 15,35 |

Аналіз даних табл. 2 показує, що величини повних масових коефіцієнтів ослаблення для різних складів руди є лінійними функціями концентрації хрому в руді і можуть бути апроксимовані виразами

$$\mu_j^1(E_1 = 60 \text{ кеВ}) = 0,305 + 0,829q; \quad (26)$$

$$\mu_j^2(E_1 = 20 \text{ кеВ}) = 3,944 + 20,378q, \quad (27)$$

де  $q$  - концентрація хрому у руді.

У табл. 3 наведено результати розрахунків за виразами (10) - (12) значень коефіцієнтів перетворення первинного гамма-випромінювання у вторинне для кожної з компонентів хромової руди при двох значеннях енергії гамма-випромінювання джерела.

Під час розрахунків даних табл. 3 прийнято, що кут розсіювання вторинного гамма-випромінювання становить 160°, що відповідає прийнятій геометрії виміру. При некогерентному розсіюванні енергія вторинного гамма-випромінювання, розрахована за виразом (27), складала при  $E_1=60$  кеВ величину  $E_1^{pозс} = 48,6$  кеВ, а при  $E_2=20$  кеВ -  $E_2^{pозс} = 18,6$  кеВ. Мінімальна відмінність енергій первинного і вторинного гамма-випромінювання дозволяє прийняти, що масові коефіцієнти ослаблення їх приблизно рівні, тобто  $\mu_j^i(E_i^{pозс}) \approx \mu_j^i(E_i)$  скористатися виразами (26) і (27) [10].

Таблиця 3

Коефіцієнт перетворення первинного гамма-випромінювання у вторинне для компонентів хромової руди

| Енергія, E | Коефіцієнт     | Компонент             |                       |                        |                       |                       |                       |
|------------|----------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|            |                | Cr                    | Si                    | Fe                     | Al                    | Mg                    | O <sub>2</sub>        |
| 1          | 2              | 3                     | 4                     | 5                      | 6                     | 7                     | 8                     |
| 60 кеВ     | $K_{1K}^{(1)}$ | $8,603 \cdot 10^{-4}$ | $3,171 \cdot 10^{-4}$ | $10,156 \cdot 10^{-4}$ | $2,633 \cdot 10^{-4}$ | $2,33 \cdot 10^{-4}$  | $1,036 \cdot 10^{-4}$ |
|            | $K_{2K}^{(1)}$ | $1,455 \cdot 10^{-2}$ | $1,575 \cdot 10^{-2}$ | $1,462 \cdot 10^{-2}$  | $1,515 \cdot 10^{-2}$ | $1,575 \cdot 10^{-2}$ | $1,575 \cdot 10^{-2}$ |
|            | $K_{3K}^{(1)}$ | $4,165 \cdot 10^{-2}$ | $8,323 \cdot 10^{-4}$ | $7,022 \cdot 10^{-2}$  | $4,446 \cdot 10^{-4}$ | $2,419 \cdot 10^{-4}$ | -                     |

| 1      | 2              | 3                     | 4                     | 5                     | 6                     | 7                     | 8                     |
|--------|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 20 кеВ | $K_{1K}^{(1)}$ | $2,322 \cdot 10^{-2}$ | $8,561 \cdot 10^{-3}$ | $2,742 \cdot 10^{-2}$ | $7,108 \cdot 10^{-3}$ | $6,29 \cdot 10^{-3}$  | $2,796 \cdot 10^{-3}$ |
|        | $K_{2K}^{(1)}$ | $1,871 \cdot 10^{-2}$ | $2,025 \cdot 10^{-2}$ | $1,879 \cdot 10^{-2}$ | $1,948 \cdot 10^{-2}$ | $2,025 \cdot 10^{-2}$ | $2,025 \cdot 10^{-2}$ |
|        | $K_{3K}^{(1)}$ | $3,712 \cdot 10^{-1}$ | $1,009 \cdot 10^{-2}$ | $5,655 \cdot 10^{-1}$ | $5,536 \cdot 10^{-3}$ | $3,128 \cdot 10^{-5}$ | -                     |

У табл. 4 наведено величини повних масових коефіцієнтів ослаблення гамма-випромінювання для значень енергій характеристичного рентгенівського випромінювання з кожної компоненти хромової руди.

Повні масові коефіцієнти ослаблення, розраховані кожному за значення енергії характеристичного випромінювання для різних складів хромової руди наведено в табл. 5.

Таблиця 4

Повні масові коефіцієнти ослаблення гамма-випромінювання для енергій характеристичного рентгенівського випромінювання

| Компонент      | Енергія характеристичного рентгенівського випромінювання (ХРВ), E (еВ) |      |      |      |      |
|----------------|--|------|------|------|------|
|                | 1254   | 1487 | 1740 | 5414 | 6403 |
| Cr             | 6000   | 3000 | 2100 | 80   | 600  |
| Si             | 1000   | 527  | 400  | 230  | 120  |
| Fe             | 7000   | 3900 | 2800 | 100  | 70   |
| Al             | 500  | 395  | 4500 | 150  | 100  |
| Mg             | 600  | 5000 | 3000 | 120  | 70   |
| O <sub>2</sub> | 3000   | 1500 | 1000 | 55   | 20   |

Таблиця 5

Масові коефіцієнти ослаблення

| Енергія ХРВ, (еВ) | Концентрація Cr у зразках q, % |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------|--------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                   | 0                              | 4    | 10    | 16    | 22    | 27    | 33    | 39    | 45    | 51    | 56    |
| 1254              | 1618                           | 1858 | 2184  | 2479  | 2795  | 3094  | 3423  | 3766  | 4051  | 4362  | 46,33 |
| 1487              | 2624                           | 2654 | 2426  | 2782  | 2850  | 2863  | 2890  | 2924  | 2977  | 3042  | 30,41 |
| 1740              | 1666                           | 1710 | 1776  | 1846  | 1926  | 1988  | 2047  | 2129  | 2236  | 2323  | 2395  |
| 5414              | 140,1                          | 137  | 132,5 | 128,2 | 124   | 119,4 | 114,6 | 108,5 | 105,2 | 101,2 | 96,9  |
| 6403              | 74,8                           | 95,8 | 125,1 | 158,6 | 190,3 | 216   | 247,2 | 277,7 | 310,1 | 341,9 | 367,8 |

Для визначення відносного вкладу у вторинне гамма-випромінювання кожного з трьох різновидів взаємодії гамма-випромінювання з розраховуємо величини

$$\varphi_1^{(i,\delta)} = \sum_{K=1}^l \frac{K_{\delta K}^{(i)}}{\mu_j^{(i)} + \mu_{\delta K}^{(i)}} \cdot q_K, \quad (\delta = 1, 2) \quad (28)$$

$$\varphi_1^{(i,3)} = \sum_{K=1}^l \sum_{r=1}^l \frac{K_{3K}^{(i)}}{\mu_j^{(i)} + \mu_{3r}^{(i)}} \cdot q_K; \quad (29)$$

$$\varphi_1^{(i)} = \sum_{\delta=1}^3 \varphi_1^{(i,\delta)}; \quad \varphi_1 = \varepsilon \varphi_1^{(1)} + (1 - \varepsilon) \varphi_1^{(2)}. \quad (30)$$

В табл. 6 наведено результати розрахунків за виразами (28)-(30). Аналіз даних табл. 6 свідчить, що основний внесок у вторинне гамма-випромінювання вносить некогерентне розсіювання при енергії джерела гамма-випромінювання 60 кеВ  $\varphi_1^{(1,2)}$ .

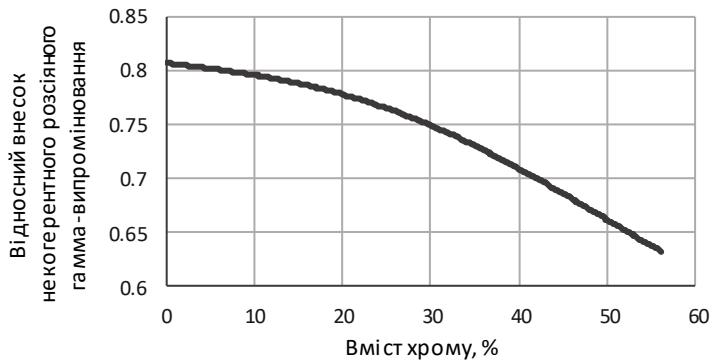
Таблиця 6

Величини  $\varphi_1^{(i,\sigma)}$  для різних складів хромової руди

| Енергія E, кеВ | $\varphi_1^{(i,\sigma)}$ | Вміст Cr, % |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------|--------------------------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                |                          | 0           | 4    | 10   | 16   | 22   | 27   | 33   | 39   | 45   | 51   | 56   |
| 1              | 2                        | 3           | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   |
| 60             | $\varphi_1^{(1,1)} 10^4$ | 4,43        | 4,44 | 4,44 | 4,45 | 4,46 | 4,46 | 4,47 | 4,46 | 4,46 | 4,47 | 4,47 |
|                | $\varphi_1^{(1,2)} 10^2$ | 2,56        | 2,28 | 1,98 | 1,77 | 1,58 | 1,44 | 1,31 | 1,20 | 1,11 | 1,02 | 0,97 |
|                | $\varphi_1^{(1,3)} 10^4$ | 0,47        | 0,68 | 0,70 | 0,85 | 1,05 | 1,25 | 1,49 | 1,77 | 2,04 | 2,35 | 2,65 |

|       |                          |      |       |      |      |      |       |       |       |       |       |       |
|-------|--------------------------|------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1     | 2                        | 3    | 4     | 5    | 6    | 7    | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    |
| 20    | $\varphi_1^{(2,1)} 10^4$ | 9,24 | 8,44  | 7,72 | 7,29 | 6,95 | 6,72  | 6,53  | 6,36  | 6,23  | 6,14  | 6,05  |
|       | $\varphi_1^{(2,2)} 10^3$ | 2,55 | 2,07  | 1,65 | 1,39 | 1,17 | 1,03  | 0,91  | 0,82  | 0,74  | 0,67  | 0,62  |
|       | $\varphi_1^{(2,3)} 10^4$ | 3,62 | 4,45  | 5,68 | 6,97 | 8,60 | 10,17 | 12,05 | 14,22 | 16,23 | 18,45 | 20,54 |
| 60    | $\varphi_1^{(1)} 10^3$   | 26,1 | 23,34 | 20,5 | 18,2 | 16,3 | 15,0  | 13,71 | 12,61 | 11,7  | 10,9  | 10,4  |
| 20    | $\varphi_1^{(2)} 10^3$   | 3,8  | 3,4   | 3,0  | 2,8  | 2,7  | 2,7   | 2,8   | 2,9   | 3,0   | 3,1   | 3,3   |
| 60+20 | $\varphi_1 10^3$         | 12,7 | 11,4  | 10,0 | 9,0  | 8,1  | 7,6   | 7,2   | 6,8   | 6,5   | 6,2   | 6,1   |

На рис. 2 наведено результати розрахунків залежності відносного внеску некогерентного гамма-випромінювання у загальне вторинне гамма-випромінювання вмісту хрому в руді.



**Рис. 2.** Залежність відносного некогерентного гамма-випромінювання від вмісту хрому в руді

Залежність  $\varphi_1$  від концентрації хрому в руді має наступний вигляд

$$\varphi_1 = \frac{1}{78,7 + 195,8 \cdot q} \quad (31)$$

Параметри, що входять до виразу (31), знайдені за методом найменших квадратів. З урахуванням формули (31) математи-

чна модель, що описується виразом (18), набуває вигляду

$$N(X) = \frac{\pi}{16} \cdot \frac{Q_0 \cdot tg^2 \frac{\alpha}{2}}{78,7 + 195,8 \cdot q} \left( \frac{L^2}{(H + X)^2} - \frac{M^2}{X^2} \right), \quad (32)$$

де  $Q_0$  - активність джерела;  $q$  - концентрація хрому у пробі;  $L$ ,  $M$  - діаметри вікна детектора та контейнера джерела, відповідно;  $H$  - відстань джерела від детектора;  $X$  - відстань джерела від пробі. Формула (32) дозволяє проводити якісний аналіз залежностей при ядерно-фізичному методі контролю складу хромових руд.

Для кількісного аналізу збігу розрахункових та експериментальних даних було побудовано емпіричну модель згідно з виразом (21). У табл. 8 наведено вихідні дані та результати розрахунків параметрів  $a, b, \mu$  при різних концентраціях хрому  $q$ .

Таблиця 8

Результати розрахунку параметрів  $a, b, \mu, N$ 

| Вміст Cr, % | Найменування параметру |                  |          |          |          |            |            |            |                  |                   |      |      |       |
|-------------|------------------------|------------------|----------|----------|----------|------------|------------|------------|------------------|-------------------|------|------|-------|
|             | $Q_0$ , мК             | $\alpha$ , град. | $L$ , см | $M$ , см | $H$ , см | $X_0$ , см | $X_1$ , см | $X_2$ , см | $\bar{N}(X_1)$   | $\tilde{N}(X_z)$  | $a$  | $b$  | $\mu$ |
| 5           | 270                    | 17               | 6        | 3        | 10       | 5,5        | 12,5       | 20         | $14 \cdot 10^3$  | $13,2 \cdot 10^3$ | 0,55 | 0,74 | 0,59  |
| 37,3        | 270                    | 17               | 6        | 3        | 10       | 5,5        | 12,5       | 20         | $9,6 \cdot 10^3$ | $9 \cdot 10^3$    | 0,55 | 0,74 | 0,65  |
| 54,3        | 270                    | 17               | 6        | 3        | 10       | 5,5        | 12,5       | 20         | $6,4 \cdot 10^3$ | $5,7 \cdot 10^3$  | 0,55 | 0,74 | 1,17  |

За даними табл. 8 величини  $\tilde{N}(X_1)$  та  $\mu$  залежать від концентрації хрому в руді. Ці залежності можуть бути апроксимовані такими виразами

$$\tilde{N}(X_1) = d Q_0 t g^2 \frac{\alpha}{2} \frac{(L^{2/3} - M^{2/3})^2 (L^{2/3} + M^{2/3})}{H^2} (1 - q),$$

де  $d = 3,1 \cdot 10^4$ ;  $\mu = 0,698 - 2,296q + 5,582q^2$ .

Числові параметри, що входять до цих виразів, визначено за методом найменших квадратів. Підставляючи  $\tilde{N}(X_1)$  та  $\mu$  в вираз (21) отримуємо шукану емпіричну модель

$$N = \frac{3,1 \cdot 10^4 \text{tg}^2 \frac{\alpha}{H^2} (L^{2/3} - M^{2/3})^2 (L^{2/3} + M^{2/3}) (1-q) \times \left( \frac{X_1}{X} \left( \frac{\ln \frac{X}{X_0}}{\ln \frac{X_1}{X_0}} \right)^{\ln \frac{X_1}{X_0}} \right)^{(0,698 - 2,296q + 5,582q^2)} \quad (33)$$

$$\text{де } X_0 = 0,55 \frac{H}{\frac{L}{M} - 1}; \quad X_1 = 0,74 \frac{H}{\left(\frac{L}{M}\right)^{2/3} - 1}.$$

На рис. 3 наведено графіки, які демонструють результати розрахунків математичної моделі (33) в порівнянні з експериментальними даними для різного вмісту хрому в руді, за якими можна стверджувати, що при  $q = 5\%$  середнє відносне відхилення становить  $6,6\%$ , при  $q = 37,3\%$  -  $2,8\%$ , а при  $q = 50,3\%$  -  $9,3\%$ .

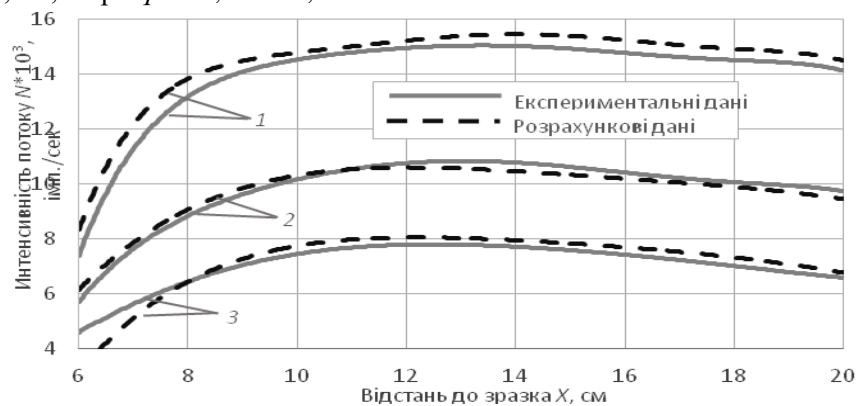


Рис. 3. Залежність величини потоку вторинного гамма-випромінювання  $N$  від відстані до пробки ( $X$ ) при різних концентраціях оксиду хрому в руді 1 -  $q = 5\%$ ; 2 -  $q = 37,3\%$ ; 3 -  $q = 50,3\%$

### Висновки та напрямки подальших досліджень.

1. На основі законів взаємодії гамма-випромінювання з речовиною побудована математична модель, за допомогою якої можна представити інтенсивність розсіяного гамма-випромінювання як функцію фізичних констант досліджуваного середовища та геометричних вимірювань.

2. На прикладі дослідження хромових руд реалізовано нову математичну модель, що дозволило якісно проаналізувати основні залежності зони вимірювання.

3. Побудовано емпіричну модель розрахунку величини потоку розсіяного гамма-випромінювання, яка дозволила врахувати якісні особливості залежностей, знайдених в моделі першого етапу, і домогтися задовільного збігу експериментальних даних з розрахунковими шляхом введення числових параметрів у модель.

4. Описану методологію побудови математичних моделей можна використовувати при ядерно-фізичному методі контролю якості руд чорних металів.

### Список літератури

1. Интернет-сайт russian Metallurgy Experts Team <http://rusmet.ru>
2. Качество минерального сырья: монография / А.А. Азарян, В.А. Колосов, Л.А. Ломовцев, А.Д. Учитель // - Кривой Рог: Минерал, 2001. - 201 с.
3. Азарян А.А. Разработка методов и средств физико-технического контроля и управления качеством руд черных металлов при добыче и переработке / Дисс. д.т.н., Киев., ин-т Гидромеханики НАН Украины, 1993. - 470 с.
4. Горшков Г.В. Проникающие излучения радиоактивных источников. - Л.: Недра, Ленинградское отделение, 1967. - 394 с.
5. Азарян А.А. Ядерно-физический метод контроля качества; минерального сырья на конвейере. - Киев, -1990. - 81 с. - Деп. В УкрНИИТИ. 17.10.90, № 1728.
6. Старчик Л.П., Пак Ю.Н. Ядерно-физические методы контроля качества твердого топлива. - М.: Недра, 1985. - 223 с.

7. Червко В.И. Исследование метода рассеянного гамма-излучения для контроля содержания тяжелого компонента в жидких средах и взвесах сложного состава: Автореф. дис. канд. техн. наук. - Алма-Ата, 1975. - 16 с.
8. Азарян А.А. Математическое моделирование ядерно-физических методов анализа хромовых руд / А.А. Азарян, В.М. Серебренников // Горный журнал. - 1968. - №6. - С. 8.
9. Azarian A. A. Geophysical methods for controlling the useful component content as the basis for the quality management system at mining and processing enterprises / A.A. Azarian, V.A. Azarian // Journal of Geology, Geography and Geoecology. -2020. -29(1). -p.3-15.
10. Kozhevnikov D.A. A Method of Geometrical Factors in the Theory and Interpretation of Formation Density Logging Data. / D.A. Kozhevnikov, I.Ph. Khatmullin // Nuclear Geophysics. -1990, Vol.4, No.4, pp. 413-424

УДК 622.235:622.271

Г.І. ЄРЕМЕНКО, канд. техн. наук, доц., Д.А. ТІТОВ, магістр, Академія гірничих наук України  
С.М. ГЕНКУЛЕНКО, головний інженер ТОВ «РУДОМАЙН»  
Д.В. ЗАГОРСЬКИЙ, гірничий інженер, директор ТОВ «БЛАСТКО МАЙНИНГ СЕРВІС»  
О.П. СТІЛЕЦЬ, гірничий інженер, директор Центру з підричних робіт  
Національного технічного університету (Дніпровська політехніка)

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ НОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ВАРІАЦІЙ ПАРАМЕТРІВ БПР В КАР'ЄРІ «ПІВДЕННИЙ» ТОВ «РУДОМАЙН»

**Основною метою** дослідження є формулювання змісту й алгоритму реалізації експериментальних досліджень для визначення можливості та шляхів максимально можливого зниження шкідливих впливів на довкілля масових технологічних вибухів у кар'єрах в межах населених пунктів шляхом створення доступних для підприємств спеціальних пілопридушуючих сумішей та технологій їх застосування.

**Методами дослідження** є факторний та компаративний аналіз результатів апаратної реєстрації даних щодо впливу розробленої авторами даної статті суміші на виділення мінерального пилу в процесі руйнування породного масиву вибухом на відкритих розробках.

**Наукова новизна** дослідження полягає в установленні закономірності впливу нового пілопридушуючого розчину на виділення мінерального пилу в атмосферу при руйнуванні скельних гірських порід вибухом.

**Практичне значення.** Подальший розвиток і виробниче застосування результатів досліджень забезпечить значне зниження викидів пилу за рахунок підвищення ефективності буро-вибухових робіт у залізорудному кар'єрі.

**Результати.** В експерименті загалом було використано 13 т розчину «DUSTRON™EX17» для розробки методу формування гідро-забивки свердловин. На 1 свердловину витрачено 400 л реагенту (250 л - у зовнішню гідро-забивку і 150 л - у внутрішню). Питомі витрати розчину реагенту - 0,619 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; вартість витрат розчину на 1 м<sup>3</sup> гірничої маси складає 0,619 грн. Випробування розчину реагенту «DUSTRON™EX17» для формування гідро-забивок довели свою технологічність та екологічну ефективність. Використання реагенту «DUSTRON™EX17» знижує виділення пилу на 27%, а висоту пило-газової хмари - на 20-30 м. За результатами виконаних досліджень рекомендовано конструкції свердловинних зарядів з гідро-забивкою.

**Ключові слова:** гірська порода, вибухове руйнування, вибух, свердловинні заряди, гідро-забивка свердловин.

doi:10.31721/2306-5435-2022-1-110-22-27

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** На даний час Україна залишається одним зі світових лідерів щодо розробки покладів залізних руд, а Криворізький залізорудний басейн - головним регіональним осередком відкритих гірничих робіт та локалізації найпотужніших гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) країни. Разом з тим, родовища високоякісних руд стрімко виснажуються, чим і зумовлюється абсолютно вимушене на даний час продовження розробки якісних залізних руд у відносно невеликих родовищах, які опинилися фактично в центральних густозаселених районах внаслідок закономірного розвитку міста Кривого Рогу як соціально-промислового комплексу освоєння унікальної за своїми масштабами та потужністю залізорудної формації уздовж її окремих найбагатших заруднених зон. Враховуючи ж екологічну та сейсмічну агресивність відкритих розробок, набуває неабиякої актуальності проблема нормалізації впливу факторів гірничих технологій на довкілля за даних умов. Особливо потужним чинником відкритих гірничих робіт є масові промислові вибухи, реалізація яких регламентується надзвичайно жорстко законодавством [1-7], що здебільшого вкрай