

В. С. МОРКУН, Н. В. МОРКУН, доктори техн. наук, професори,
В. В. ТРОНЬ, канд. техн. наук, доц., А. А. ГАПОНЕНКО,
І. А. ГАПОНЕНКО, наукові співробітники
Криворізький національний університет
Д. І. ПАРАНЮК, інженер
ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН

Метою є підвищення ефективності процесу керування бурінням свердловин в умовах змінення фізико-механічних і хіміко-мінералогічних характеристик гірської породи, що буриться. Основним завданням є обґрунтування критерію та розроблення методів оптимізації процесу буріння свердловин в умовах змінення характеристик різновидів гірських порід у процесі буріння.

Методи дослідження. У роботі використано такі методи: аналіз вітчизняної і світової літератури з теми дослідження; методи аналітичного синтезу математичних моделей, методи математичної статистики і теорії імовірності для оброблення результатів експериментів; методи комп'ютерного моделювання; методи чисельного моделювання.

Наукова новизна полягає у тому, що для оптимізації процесу буріння свердловин запропоновано метод, який відрізняється від відомих тим, що визначення різновидів гірських порід здійснюють із застосуванням адаптивної нейро-нечіткої моделі, навчання якої здійснюють на основі результатів каротажу із застосуванням ультразвукових, ядерно-фізичних та магнітометричних тестових вимірювань та з урахуванням оперативних параметрів силової установки у процесі буріння.

Практичне значення полягає у розробленні рекомендацій до визначення переліку параметрів, які необхідно враховувати у процесі оптимізації процесу буріння свердловин в умовах різних типів геолого-мінералогічної структури гірської породи. Зокрема, при бінарній структурі швидкість буріння і крутний момент є достатніми вхідними параметрами для ефективної оцінки, точність ідентифікації при цьому становить до 95%. Водночас, використання зазначених показників для оптимізації процесів буріння породи у залізорудних родовищах є недостатнім, оскільки точність розпізнавання різновидів моделлю із 2 входами не перевищує 55%. Тому доцільнішим є застосування 8 входів, що дозволяє досягти точності 91%.

Результати. Для опису складних процесів руйнування гірських порід у перевантажених локальних областях у процесі буріння доцільно застосувати безрозмірний енергетичний критерій маятникових хвиль і геомеханічного квазірезонансу, що дозволяє надати кількісну оцінку оптимального енергетичного діапазону, що спрямовується бурильною установкою до бурового інструменту. Водночас, при розрахунку енергетичного критерію об'ємного руйнування гірської у процесі буріння необхідна інформація як про характеристики гірських порід, що буряться, так і параметри функціонування бурової установки.

Ключові слова: оптимізація, буріння свердловин, каротаж, різновиди руди, нейро-нечітка модель.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-96-101

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. У процесі керування бурінням на гірничих підприємствах важливим технологічним аспектом є налаштування параметрів та режимів функціонування бурового інструменту у відповідності до умов буріння з урахуванням технічних та технологічних факторів.

Оптимізація процесу керування бурінням свердловин характеризується інформаційною невизначеністю та потребує урахування численних збурюючих факторів. Особливої ваги дана проблема набуває при бурінні свердловин для різних в умовах складної структури гірської породи, що утворена декількома мінералого-технологічними різновидами. Оперативний розрахунок робочих параметрів буріння, які відповідають оптимальним значенням дозволить підвищити ефективність даного процесу.

Аналіз досліджень та публікацій. У праці [1] представлено теоретичне обґрунтування і експериментальну перевірку ефективності енергетичного критерію об'ємного руйнування гірських порід у процесі буріння. Даний критерій адаптовано до експлуатаційних характеристик різних бурових установок шляхом запровадження емпіричних коефіцієнтів для перетворення величини споживаної енергії буріння у відповідні енергетичні характеристики руйнування напруженої породи в зоні забою. Представлено математичний опис критерію мінімального споживання енергії буріння в залежності від напруженого стану та фізичних властивостей гірських порід, а також від сили обертового механізму подачі.

Вибір і адаптацію параметрів буріння запропоновано проводити з урахуванням характеристик масиву гірських порід конкретного родовища [2]. Зроблено висновок про необхідність аналізу їх напруженого стану типу та інших енергетичних факторів процесу буріння, оскільки кожен з них має суттєві особливості, що впливають на енергоспоживання у процесі буріння.

У роботах [3, 4] запропоновано безрозмірний енергетичний критерій ефективності буріння. Оцінка ефективності руйнування гірських порід при цьому здійснюється на основі енергетичних принципів нелінійної геомеханіки – явищ типового відгуку гірських порід на динамічні удари і хвилі коливального типу [5–8].

Як цільову функцію оптимізації буріння свердловин у праці [9] запропоновано використовувати мінімізацію вартості даного процесу при використанні двох або більшої кількості незалежних параметрів. Водночас, оптимізація буріння здійснюється на основі припущення, яке полягає у тому, що обладнання бурильної установки відповідає гірничо-геологічним умовам.

В умовах залізородних родовищ характеристики гірничих порід варіюються у значних межах [10–13]. У зв'язку з цим, для уточнення контурів родовищ, формування їх геологічної моделі із визначенням розподілу в масиві мінералого-технологічних різновидів корисних копалин та їх якісних характеристик виконують дослідження.

Постановка завдання. Метою підвищення ефективності процесу керування бурінням свердловин в умовах змінення фізико-механічних і хіміко-мінералогічних характеристик гірської породи, що буриться. Основним завданням є обґрунтування критерію та розроблення методів оптимізації процесу буріння свердловин в умовах змінення характеристик різновидів гірських порід у процесі буріння.

Викладення матеріалу та результати. У математичній моделі процесів руйнування породи для механічних навантажень використовують показники граничної міцності й об'ємної міцності при одноосьовому стисканні, розтягненні та зсуві. Показник об'ємної міцності характеризується [1] трьома основними компонентами тензора напружень $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$, який задано коефіцієнтом Лодє-Надаї:

$$m_s = \frac{2s_2 - s_1 - s_3}{s_1 - s_2}. \quad (1)$$

Значення даного коефіцієнту варіюється у діапазоні $[-1; +1]$. Найбільш поширеними в гірничодобувній промисловості є показники одноосьового стиснення σ_c і розтягування σ_t гірських порід, що задають основний діапазон характеристик міцності гірських порід при різних типах напруженого стану. Слід відзначити, що для більшості типів порід їх межа міцності при одноосьовому стисканні істотно відрізняється від межі міцності при одноосьовому розтягуванні і найчастіше визначається виразом [14]: $s_c \hat{=} (5, 30)s_t$.

Для опису складних процесів руйнування гірських порід у перевантажених локальних областях (механічні удари, вибухи, землетруси, гірські удари) у відповідності до [1–3, 15–16] використано безрозмірний енергетичний критерій маятникових хвиль і геомеханічного квазірезонансу

$$h = \frac{W}{Mv_p^2}; \quad (2)$$

$$W = a(V)[U_0 + W_k], \quad (3)$$

де $M = \rho V$; $[U_0 + W_k]$ – сума відповідно потенційних та кінетичних енергій елементів конструкції гірських порід у зоні локального руйнування; $a(V)$ – коефіцієнт вибухового ефекту, визначений у [17]; V – об'єм фокусної зони; ρ – густина породи; v_p – швидкість Р-хвилі залежно від модуля Юнга, коефіцієнта Пуассона і густини гірських порід. У процесі буріння масиву гірських порід параметр U_0 характеризує напружений стан в свердловині з енергетичних позицій, а W_k – кінетичну енергію, що передається буровим інструментом. Отже, рівняння (2) і (3) дозволяють надати кількісну оцінку оптимального енергетичного діапазону, що спрямовується бурильною установкою до бурового інструменту з точки зору теорії маятникових хвиль.

При розрахунку енергетичного критерію об'ємного руйнування гірської у процесі буріння необхідна інформація про питому вагу руди і гірських порід у поєднанні із значенням поздовжньої швидкості

$$k = \frac{E(t)a}{V_p(t)rv_p^2}, \quad (4)$$

де $E(t)$ – енергія, що витрачається буровим інструментом для руйнування породи у контрольній ділянці свердловини; a – розрахунковий коефіцієнт сейсмічного впливу підземних вибухових робіт; $V_p(t)$ – обсяг розбитої породи у контрольній ділянці свердловини.

Серед керованих параметрів процесу буріння виділяють відношення навантаження на долото до його діаметру та частоту обертання [9]. Залежність швидкості буріння від зазначених вище параметрів та з урахуванням зносу робочої поверхні долота має вид

$$\frac{dF}{dt} = f \frac{\alpha W}{c d_b}, N, h, \quad (5)$$

де F – швидкість проникнення, h – знос висоти долота, N – частота обертання. Водночас, доцільним є застосування більш повної математичної моделі швидкості буріння, запропонована у [18]

$$\frac{dF}{dt} = \exp \left(\hat{a}_1 + \sum_{j=2}^8 a_j x_j \right) \hat{u}, \quad (6)$$

де $x_2 - x_8$ – параметри буріння: x_2 – глибина, x_3 – ущільнення пласта, x_4 – перепад тиску, x_5 – вага долота, x_6 – частота обертання, x_7 – зношування долота, x_8 – гідравлічна характеристика долота; параметри моделі: a_1 – міцність породи, a_2 – глибина, a_3 – ущільнення пласта, a_4 – перепад тиску, a_5 – осьове навантаження на долото, a_6 – частота обертання, a_7 – зношування долота, a_8 – гідравлічний показник. Параметри a_1, \dots, a_8 виразу (6) визначають за допомогою методу нелінійної регресії.

Вплив кожного із наведених параметрів на результат розрахунку полягає у наступному [18]. Вплив міцності пласта вважається таким, що дорівнює: $x_1 = 1$. Вплив глибини описують залежністю

$$x_2 = 8000 - D, \quad (7)$$

де D – глибина свердловини, м.

Вплив показника ущільнення пласта представлено виразом

$$x_3 = D^{0.69} (g_p - 9), \quad (8)$$

де g_p – градієнт порового тиску породи.

Перепад тиску у забої свердловини описують рівнянням

$$x_4 = D^{0.69} (g_p - r_c), \quad (9)$$

де r_c – еквівалентна густина циркулюючого бурового розчину у свердловині.

Розрахунок впливу ваги долота та діаметра наведено у рівнянні

$$x_5 = \ln \frac{\hat{e} W/d_b - (W/d_b)_t}{\hat{e} 4 - (W/d_b)_t} \hat{u}, \quad (10)$$

де d_b – діаметр долота; W – вага долота; t – час обертання долота.

Вплив швидкості обертання представлено рівнянням

$$x_6 = \ln [N/60], \quad (11)$$

де N – швидкість обертання.

Ефект зношування долота описують рівнянням

$$x_7 = (-h), \quad (12)$$

де h – величина притуплення зубців долота.

Гідравлічний показник визначається рівнянням

$$x_8 = \frac{pq}{350 ml_n}, \quad (13)$$

де μ – видима в'язкість; d_n – еквівалентний діаметр розпилювача.

Для оптимізації процесу буріння свердловин пропонується метод, що складається з таких етапів. На початку виконують буріння свердловин із фіксацією тестових параметрів силової установки та відбором кернів з наступним встановленням відповідності між тестовими параметрами силової установки та характеристиками гірської породи з кернів. Після чого проводять каротаж пробурених свердловин із використанням ультразвукових, ядерно-фізичних та магнітометричних методів з подальшим встановленням відповідності між тестовими параметрами силової установки, результатами ультразвукових, ядерно-фізичних, магнітометричних вимірювань та характеристиками гірської породи з кернів. На основі одержаної інформації синтезують та навчають адаптивні нейро-нечіткі структури для визначення основних різновидів гірських порід. Із застосуванням одержаної нейро-нечіткої моделі виконують формування бази даних основних різновидів гірських порід, використовуючи тестові результати ультразвукових, ядерно-фізичних, магнітометричних вимірювань та параметрів силової установки. На наступному етапі виконують буріння свердловин з фіксацією оперативних параметрів силової установки та на основі даних параметрів та одержаної раніше бази даних визначають різновиди гірської породи, що буриться. Після чого здійснюють визначення та встановлення оптимальних параметрів силової установки відповідно до вибраного критерію. Виконують динамічну корекцію параметрів силової установки відповідно до алгоритму адаптації. Після завершення процесу буріння свердловини виконують її каротаж із застосуванням ультразвукових, ядерно-фізичних та магнітометричних тестових вимірювань впродовж всієї її глибини та здійснюють нейро-нечіткої моделі та поповнення бази даних основних різновидів гірських порід на основі отриманої інформації, у тому числі, при наявності кернів. На останньому етапі виконують передавання отриманої інформації до центрального банку даних для використання при бурінні інших свердловин.

Електромагнітне акустичне збудження ультразвуку засновано на використанні сил Лоренца. Котушка індуктивності, що розташована поблизу поверхні гірської породи, формує високочастотний електромагнітний сигнал. Реакція металу відбувається в класичній глибині шкін-шару δ , де активується вихровий струм $j(z,t)$ і пов'язане з ним електричне поле $E(z,t)$. Застосування статичного магнітного поля порушує баланс породжуючи силу Лоренца, яка діє на електрони та визначається таким співвідношенням [20]

$$F(z) = \frac{j(z) \cdot B_0}{n_0}, \quad (14)$$

де n_0 - щільність електронів. Для вектору магнітної індукції B_0 , орієнтованого по вісі Ox , сила Лоренца є поздовжньою, що призводить до зміни щільності заряду електронів вздовж Oz . Внутрішнє електричне поле $E(z)$, орієнтоване по вісі Oz , має існувати для підтримки нейтральності заряду. Його іони призводять до компресійних коливань амплітуди ξ_z . Вектор магнітної індукції B_0 спрямований до Oz , струми $j(z,t)$ спрямовані до Oy , а сила Лоренца діє у напрямку Ox . Сили Лоренца діють, спричиняючи напруження зсуву вздовж Ox , внаслідок чого виникають зсувні коливання амплітудою ξ_x . Отже, для цих двох поляризацій рівняння акустичної хвилі має вигляд [20]

$$\frac{\nabla^2 x}{r^2} - s^2 \frac{\nabla^2 x}{z^2} = \frac{|j \cdot B_0|}{r}, \quad (15)$$

де s – швидкість ультразвукової хвилі.

У праці [21] показано, що у випадку коли $\delta \ll \lambda$ та на відстанях $z \gg \delta$ маємо наступне хвильове рішення

$$|x| = \frac{BB_0}{m_0 d s w} \frac{1}{(1 + b^2)^{1/2}}, \quad (16)$$

де $b = q^2 d^2 / 2$; q – хвильове число. Коефіцієнт перетворення η електромагнітного акустичного перетворювача є відношенням генерованої акустичної потужності P до електромагнітної потужності Q , що надходить на поверхню породи

$$h = \frac{2B_0^2}{m_0 (d s w d)}. \quad (17)$$

Слід відзначити, що у феромагнітному матеріалі створюються додаткові сили через магнітострикційні напруження, оскільки ультразвукова хвиля більше не є лінійною функцією прикладеного магнітного поля.

У процесі проведених експериментальних досліджень в якості вхідних змінних використовувалися послідовні комбінації від 2 до 8 входів з наступного переліку [22]: швидкість буріння, крутний момент, питома енергія руйнування, горизонтальна вібрація, вертикальна вібрація, відхилення швидкості буріння, відхилення осевого навантаження, результати ультразвукових, магнітометричних та ядерно-фізичних вимірювань. Одержані результати показали, що в умовах бінарної структури гірської породи швидкість буріння і крутний момент є достатніми вхідними параметрами для ефективної оцінки, точність ідентифікації при цьому становить до 95%. Водночас, використання зазначених показників для оптимізації процесів буріння породи у залізрудних родовищах є недостатнім, оскільки точність розпізнавання різновидів моделлю із 2 входами не перевищує 55%. Тому доцільнішим є застосування 8 входів, що дозволяє досягти точності 91%.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Для опису складних процесів руйнування гірських порід у переважаних локальних областях, зокрема у процесі буріння доцільно застосувати безрозмірний енергетичний критерій маятникових хвиль і геомеханічного квазірезонансу, що дозволяє надати кількісну оцінку оптимального енергетичного діапазону, що спрямовується бурильною установкою до бурового інструменту. Водночас, при розрахунку енергетичного критерію об'ємного руйнування гірської у процесі буріння необхідна інформація як про характеристики гірських порід, що буряться, так і параметри функціонування бурової установки.

Для оптимізації процесу буріння свердловин запропоновано метод, який відрізняється від відомих тим, що визначення різновидів гірських порід здійснюють із застосуванням адаптивної нейро-нечіткої моделі, навчання якої здійснюють на основі результатів каротажу із застосуванням ультразвукових, ядерно-фізичних та магнітометричних тестових вимірювань та з урахуванням з оперативних параметрів силової установки у процесі буріння.

Список літератури

1. **Oparin V. N., Timonin V. V., Karpov V. N., Smolyanitsky B. N.** Energy-based volumetric rock destruction criterion in the rotary-percussion drilling technology improvement // *Journal of Mining Science*. 2017. Vol. 53. No. 6. P. 1043–1064
2. **Karpov V.N.** Estimation procedure of down-the-hole air hammers in drilling process // *Fundamental and Application Mining Science*. 2016. Vol. 2. No. 3. P. 74–80.
3. **Oparin V.N., Timonin V.V., Karpov V.N.** Quantitative estimate of rotary-percussion drilling efficiency in rocks // *Journal of Mining Science*. 2016. Vol. 52. No. 6. P. 1100–1111.
4. **Timonin V.V., Karpov V.N.** Estimate of rock failure process of rotary-percussion drilling // *Fundamental and Application Mining Science*. 2016. Vol. 2. No. 3. P. 60–74.
5. **Adushkin V.V., Oparin V.N.** From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed geomeia. Part I // *Journal of Mining Science*. 2012. Vol. 48. No. 2. P. 203–222.
6. **Adushkin V.V., Oparin V.N.** From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed geomeia. Part II // *Journal of Mining Science*. 2013. Vol. 49. No. 2. P. 175–209.
7. **Adushkin V.V., Oparin V.N.** From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed geomeia. Part III // *Journal of Mining Science*. 2014. Vol. 50. No. 4. P. 623–645.
8. **Adushkin V.V., Oparin V.N.** From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed geomeia. Part IV // *Journal of Mining Science*. 2016. Vol. 52. No. 1. P. 1–35.
9. **Pervez A. S. N.** Real time rate of penetration, prediction and optimization during drilling operations. Masters thesis, Universiti Teknologi PETRONAS. 2012. 88 p.
10. **Stupnik M.I., Kalinichenko V.O., Pysmennyi S.V., Kalinichenko O.V.** Determining the qualitative composition of the equivalent material for simulation of Kryvyi Rih iron ore basin rocks // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2018. Vol. 4. P. 21–27.
11. **Stupnik N., Kalinichenko V., Pismennij S., Kalinichenko E.** Features of underlying levels opening at «ArcelorMittal Krivyi Rih» underground mine // *New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, 2015. P. 39-44.
12. **Kalinichenko V., Pysmennyi S., Shvaha N., Kalinichenko O.** Selective underground mining of complex structured ore bodies of Kryvyi Rih Iron Ore Basin // *E3S Web of Conferences*. 2018. Vol. 60. 00041.
13. **Fedko M.B., Muzyka I.O., Pysmennyi S.V., Kalinichenko O.V.** Determination of drilling and blasting parameters considering the stress-strain state of rock ores // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. № 1. P. 37–41.
14. ГОСТ 50544-93. Породы горные. Термины и определения. [Чинний від 2010-02-18]. 108 с.

15. **Oparin V.N.** Energy-based volumetric rock destruction criterion // Miner's Week-2009: Proceedings. Moscow: MGGU, 2009. P. 43–69.

16 **Oparin V.N., Simonov B.F.** Nonlinear Deformation-wave processes in the vibrational oil geotechnologies // Journal of Mining Science. 2010. Vol. 46. No. 2. P. 95–112.

17. **Садовский М. А., Кедров О. К., Пасечник И. П.** О сейсмической энергии и объеме очагов при коровых землетрясениях и подземных взрывах // Доклады. АН СССР. 1985. Том. 283. №5. С. 1153–1156.

18. **Bourgoyne A.T., Young F.S.** A multiple regression approach to optimal drilling and abnormal pressure detection // Society of Petroleum Engineers Journal. 1974. Vol. 14(4). P. 371-384.

19. **Petcher P., Potter M., Dixon S.** A new electromagnetic acoustic transducer (EMAT) design for operation on rail // NDT & E International. 2014. Vol. 65.

20. **Aliouane S., Hassam M., Badidi Bouda A., Benchaala A.** Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs) Design Evaluation of their Performances // Proceedings of 15th World Conference on Non-Destructive Testing, 15-21 October 2000. URL: <https://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn591/idn591.htm>

21. **Dobbs E. R.** Electromagnetic generation of ultrasound // Research Techniques in Nondestructive Testing. 1973. Vol. 2, P. 419-441.

22. **Tron V., Tsokurenko O., Paraniuk D., Haponenko I.** Formation of the adaptive fuzzy model of the rock geological structure for exploratory drilling // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 123. 01037.

Рукопис подано до редакції 16.04.2020

УДК 622.271.3

Є.О. НЕСМАШНИЙ, д-р техн. наук, проф.,

Г.І. ТКАЧЕНКО, К.В. ГЕРАСИМОВА, кандидати техн. наук, доценти

Криворізький національний університет

РОЗРОБЛЕННЯ ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СКОЧУВАННЯ БУТІВ ГІРСЬКОЇ ПОРОДИ З ПОРОДНИХ ВІДКОСІВ

Мета. В статті моделюються кінетичні та енергетичні процеси падіння уламків гірничих порід з вище лежачих горизонтів на транспортні берми кар'єру № 4 ПАО «ЦГЗК». Обчислюється ймовірний радіус розльоту уламків гірської породи при їх падінні з породного укосу висотою понад 30 м з метою подальшого запобігання шкоди від цих процесів і підвищення безпеки відкритих гірничих робіт.

Методи дослідження. Поставлені завдання визначили комплексний метод досліджень, що включає: аналіз науково дослідних робіт по геомеханічному обґрунтуванню стійких параметрів уступів бортів та відвалів кар'єру № 4 ПАО «ЦГЗК»; інженерно-геологічні вишукування, використання фундаментальних законів фізики, механіки та комп'ютерні технології і обчислювальні програми, які розроблені авторами, для виконання аналітичних розрахунків, оброблення, аналізу результатів досліджень.

Наукова новизна. Вперше, результати, які отримано за допомогою розробленої фізико-математичної моделі, дозволяють науково обґрунтувати ймовірні негативні процеси від скочування або падіння уламків гірничої породи, які відриваючись від поверхні схилів, скочуються до нижніх горизонтів, набуваючи значної швидкості.

Практичне значення. Розроблена фізико-математична модель для визначення ймовірного радіусу розльоту уламків гірничої породи падаючих з верхніх горизонтів кар'єра №4 ПРАТ «ЦГЗК» дозволяє оцінити їх величину при таких очікуваних процесах: - скочуванні або ковзанні по поверхням простого або складного профілю з наступним вільним падінням; - скочуванні по поверхні породного схилу складного профілю з наступним вільним падінням і непружному, нецентральному ударі об поверхні нижчих транспортних бERM або груп уступів.

Результати. Проведені дослідження й виконані аналітичні розрахунки дозволили встановити, що при існуючих геометричних параметрах уступів, груп уступів кар'єру №4 ПАО «ЦГОК», швидкість падіння уламків породи на горизонти транспортних бERM очікується в межах 0-34 м/с, кінетична енергія падаючих уламків від нуля до 12000 кДж, а значення радіусу їх розльоту можливо очікувати в межах від 1,5 до 27,2 м, в залежності від висоти схилу, його профілю, кута нахилу і очікуваних значень коефіцієнтів тертя кочення та ковзання кусків породи по поверхні схилу.

Ключові слова: відкриті гірничі роботи, падіння породних уламків, коефіцієнти тертя кочення і ковзання; радіус розльоту.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-101-106

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Сучасний стан відкритих гірничих робіт в Криворізькому залізорудному басейні характеризується їх значною глибиною. Так на кар'єрі № 4 ПАТ «ЦГЗК» гірничі роботи ведуться на глибині 320 метрів. В по-