

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 залізничному басейні характеризується їх значною глибиною. Так на кар'єрі № 4 ПАТ «ЦГЗК» гірничі роботи ведуться на глибині 320 метрів. В по-

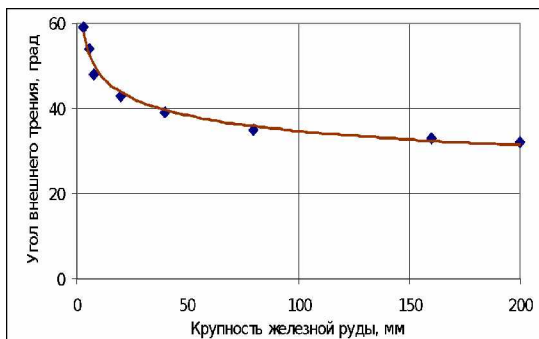
дальшому глибина розробки залізної руди буде збільшуватись до 500-750 м. При цьому кут нахилу бортів, груп уступів та уступів становить 45-75°.

У цих умовах значну небезпеку уявляють уламки гірничої породи, які відриваючись від поверхні схилів, скочуються до нижніх горизонтів, набуваючи значної швидкості, а значить і кінетичної енергії.

Для запобігання шкоди від цих процесів, розробки технічних заходів для захисту людей і гірничого обладнання, необхідна відповідна фізико-математична модель, що описує процеси кочення та ковзання уламків гірських порід по поверхні породних схилів. Саме для розв'язання цих задач і присвячено дану роботу.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Віддаючи належне науково практичним напрацюванням в області геомеханіки та безпеки відкритих гірничих робіт, треба відзначити, що у гірничотехнічній літературі небагато даних про методи і засоби експериментального визначення величини коефіцієнтів тертя кочення і ковзання стосовно до скочування та падіння уламків гірничих порід з вище лежачих горизонтів на транспортні берми залізородних кар'єрів. У роботі [7] наведено результати визначення кутів тертя відбитої залізної руди по породному моноліту. При цьому було встановлено істотне зменшення кута тертя ковзання при збільшенні крупності відбитої залізної руди, що й відображено на графіку, який наведено на рис. 1.

Апроксимація даних роботи [7], дозволила отримати аналітичний вираз для опису цієї залежності кута тертя ковзання  $\varphi$  зруйнованої скельної породи від її крупності  $d$  (в мм) в наступному вигляді:  $\varphi = 67,7 d^{-0,145}$ , град. Якість апроксимації цієї залежності досить висока і становить:  $R^2 = 0,986$ .



**Рис. 1.** Залежність кута тертя ковзання від крупності залізистих кварцитів [7]

На підґрунті досліджень [6,7], нами отримано аналітичний вираз для визначення часу ковзання кусків гірської породи по поверхні укосу в залежності від їх лінійних розмірів в наступному вигляді

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g \sin a [\sin a - \operatorname{tg}(67,7 d^{-0,145}) \cos a]}}$$

де  $h$  - висота породного укосу, м;  $d$  - лінійний розмір куска гірської породи, мм;  $a$  - кут нахилу породного укосу, град.

Цей вираз однозначно показує, що в процесі ковзання кусків породи по поверхні породного укосу буде відбуватися їх поділ по фракціях. Дрібні куски породи залишаться на поверхні укосу, великі наберуть значну швидкість і досягнуть запобіжної або транспортної берми.

Практикою гірничих робіт встановлено, що масивні шматки породи, що мають окатанну форму, котяться по поверхні укосу, а шматки породи меншого розміру ковзають по поверхні укосу вниз [6,7]. У зв'язку з цим доцільно розглядати кинематику і динаміку цих процесів окремо.

**Викладення матеріалу.** Основними параметрами при вивченні каменепадних процесів і проектуванні споруд інженерного захисту від них, є траєкторія падіння уламків породи та енергія їх впливу на захисну конструкцію.

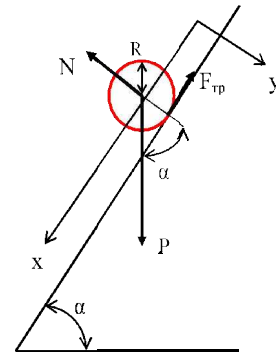
Розглянемо процес руху каменів по поверхні породного укосу. При цьому будемо вважати, що камені, які падають, відповідають моделі твердого тіла, що деформується і характеризуються наступними фізико-механічними параметрами: об'ємна вага  $\gamma$ ; лінійний розмір  $d$ ; коефіцієнт тертя кочення  $k$  і ковзання  $f$  породи по схилу. Схил (укос) характеризується кутом нахилу і відповідним поперечним профілем. Як відомо, рівновагу твердого тіла, що деформується визначається в загальному випадку системою рівнянь [5], які можуть бути перетворені в рівняння руху для твердого тіла.

Розглянемо рух уламка гірничої породи кулястої форми масою  $m$  і радіусом  $R$  під дією сили тяжіння  $P$  по похилій поверхні породного укосу. Позначимо координатні осі так, як це показано на рис. 2.

**Рис.2.** До розрахунку процесу скочування шматків породи по поверхні укосу

Тоді рівняння руху шматка породи кулястої форми можна представити у вигляді

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = mg \sin a - F_{\text{тр}} \\ m \frac{d^2 h}{dt^2} = mg \cos a - N \\ J \frac{d\omega}{dt} = F_{\text{тр}} R, \end{cases}$$



де  $J$  - момент інерції кулі відносно осі, що проходить через центр ваги. Припустимо, що переміщення уздовж осі  $OY$  будуть мінімальні і можуть бути прийняті рівними нулю. Після виконання математичних перетворень і враховуючи закон Кулона для визначення величини сили тертя кочення, остаточно маємо

$$k = \frac{2}{7} Rtg a.$$

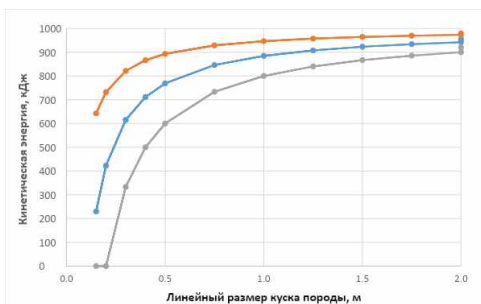
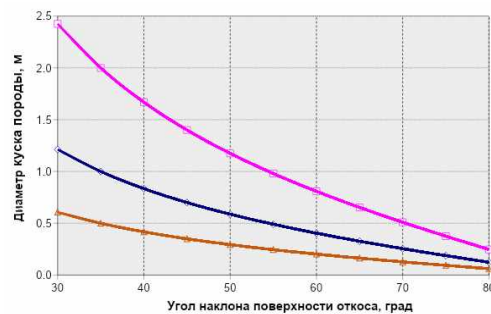
Наведене рівняння зумовлює граничну умову кочення кулі по поверхні укосу. З урахуванням того, що куски гірської породи характеризуються середнім розміром шматка  $d$  (даний параметр будемо вважати аналогічним діаметру кулі, то вищенаведений вираз можна перетворити до наступного виду  $d=7 ktg$ . На рис. 3 наведено графічні залежності між розміром кусків породи, що котяться і кутом нахилу поверхні укосу, які отримані при різних значеннях коефіцієнта тертя кочення  $k$ .

При геометричних параметрах, що знаходяться вище відповідних кривих, куски породи будуть котитися по поверхні укосу, а нижче - знаходитись в стані спокою. Практичне значення залежностей (рис. 3) полягає в тому, що при відомому куті нахилу борта кар'єру або групи уступів можна визначити розмір кусків породи, які будуть котитися по поверхні укосу. Очевидно, що куски породи меншого розміру будуть перебувати в стані спокою.

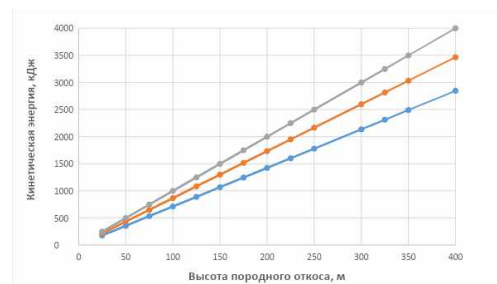
**Рис. 3.** До визначення розміру кусків породи, які будуть котитися або перебувати в стані спокою на поверхні укосу

Так при куті нахилу породного укосу в  $50^\circ$ , котитися по його поверхні будуть куски породи розміром понад 0,5 м, при коефіцієнті тертя кочення рівному  $k=0,1$  м. Встановивши даний розмір, можна, використовуючи гістограму розподілу кусків породи на поверхні укосу, визначити їх.

Після розрахунку кінетичної енергії та швидкості кочення кусків породи по поверхні укосу побудовано залежності кінетичної енергії куска породи, що скотився з укосу від його: - лінійного розміру (висота укосу 100 м, коефіцієнт тертя кочення 0,1 м);- висоти (розмір шматка породи 40 см, коефіцієнт тертя кочення 0,1 м) - лінійного розміру (висота породного укосу 100 м, коефіцієнті тертя кочення 0,1 м), див. рис. 4, 5.



**Рис.4.** Залежність кінетичної енергії куска породи, що скотився, від його лінійного розміру



**Рис.5.** Залежність кінетичної енергії куска породи, що скотився, від висоти породного укосу

На рис. 6, 7 наведено залежності лінійної швидкості шматка породи, що скотився з породного укосу від його лінійного розміру (висота породного укосу 100 м, коефіцієнт тертя кочення 0,1 м); - від висоти породного укосу (розмір шматка породи 40 см, коефіцієнт тертя кочення 0,1 м).

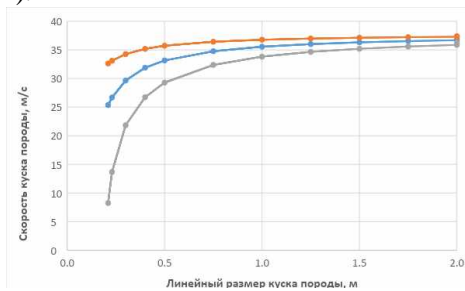


Рис. 6. Залежність кінцевої швидкості куска породи від його лінійного розміру

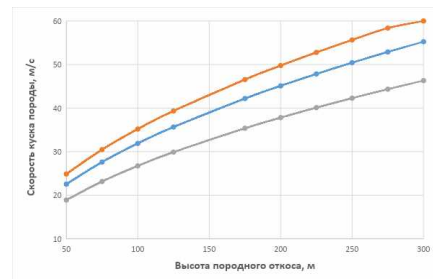


Рис. 7. Залежність кінцевої швидкості скотився шматка породи від висоти породного укосу

У рамках створеної фізико-математичної моделі була розглянута схема падіння каменів, яка полягала в тому, що камені скочуються з верхньої групи уступів, б'ються об поверхню нижньої групи уступів і після відбиття від цієї поверхні вільно падають на поверхню транспортної берми.

Очевидно, що удар каменю об поверхню укосу не буде абсолютно пружним, а тому, основним параметром, що його характеризує, буде коефіцієнт відновлення  $\rho$ , під яким розуміється відношення нормальної складової швидкості після удару  $V_n$  до нормальної складової швидкості до удару  $V_d$ , тобто:  $\rho = V_n / V_d$ .

З даного виразу, після відповідних математичних перетворень, можна отримати аналітичний вираз для визначення коефіцієнта відновлення [5]  $\rho = \tan \varphi_1 / \varphi_2$ , де  $\varphi_1$  - кут падіння каменя на поверхні укосу, град;  $\varphi_2$  - кут відбиття каменю після удару по поверхні укосу (кут відскоку), град. У роботі [14] наведено результати визначення коефіцієнта відновлення при непружному ударі скельних і напівскельних порід. Для основної маси скельних порід в кар'єрах ПРАТ «ЦГЗК», його значення може бути прийнято в межах  $\rho = 0,3 - 0,8$ .

Знаючи значення проекції швидкості каменю після відскоку на координатні осі, можна визначити можливий радіус розльоту шматка породи при його падінні на горизонтальну транспортну берму.

Якщо розглянути поверхню укосу простого профілю, зображеного на рис. 8 і вважати, що куски гірничої породи певного розміру  $d$  будуть скочуватися, практично без початкової швидкості, вниз по поверхні борту кар'єру або групи уступів висотою  $h$ , нахиленого під кутом  $\alpha$  до горизонту, то пройшовши деяку відстань по горизонтальній поверхні  $L$  вони зупиняться.

Використовуючи теорему про кінетичну енергію, сума робіт всіх діючих на кусок породи сил на шляху його руху, буде дорівнює нулю.

Сумарна робота на всьому шляху руху куска породи складається з роботи сил тяжіння і роботи сил тертя кочення. Тоді

$$mgS_1 \sin \alpha - \frac{2k}{d} mgS_1 \cos \alpha - \frac{2k}{d} mgS_2 = 0,$$

де  $k$  - коефіцієнт тертя кочення, м;  $d$  - розмір куска породи, м.

Отже, наприклад, визначивши в результаті візуального огляду величини  $S_2$  і  $d$  і знаючи висоту  $h$  і кут нахилу відвалу  $\alpha$ , з наведеного виразу може бути визначена величина коефіцієнта тертя кочення уламків гірничих або відвальних порід.

Аналітичне визначення коефіцієнта тертя кочення уламків гірничої породи на підставі аналізу фактичних даних про геометричні параметри кусків породи, що скотилися з поверхні зовнішніх відвалів ПАТ «ЦГЗК» дозволило встановити його значення в межах:  $k = 0,44 \div 0,68$ .

Профілі бортів сучасних глибоких залізородних кар'єрів мають, як правило, складну форму. При цьому верхні та нижні групи уступів мають на практиці різну висоту  $h$  і відбудовані під різними кутами нахилу  $\alpha$  (рис. 9). Горизонтальна транспортна берма, яка вимагає захисту

від падаючих уламків скельних і напівскельних порід, має ширину, яка може відрізнятись від проектних параметрів.

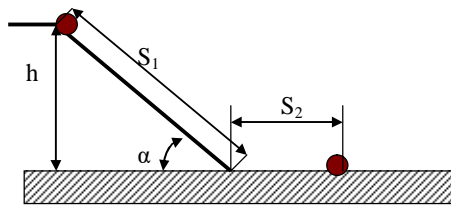


Рис. 8. До визначення коефіцієнта тертя ковчання

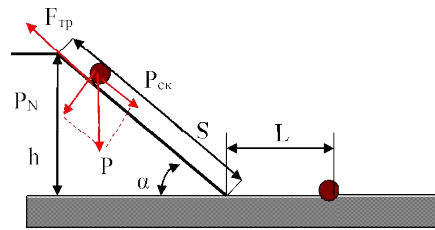


Рис. 9. До визначення радіуса розльоту при скокуванні кусків гірської породи по поверхні укосу

Найбільшу небезпеку становлять куски породи, які котяться з верхніх горизонтів, так як в цьому випадку їх кінетична енергія буде максимальна і її значення визначить максимальну дальність падіння (радіус розльоту) кусків породи на майданчику транспортної берми  $L$  (рис. 9). Визначення параметра  $L$  і є метою фізико-математичних розрахунків, так як його величина визначає необхідність і місце установки захисних споруд.

Розглядався процес скокування кусків породи з верхніх горизонтів борту кар'єру для визначення можливого радіуса їх розльоту на рівні горизонтальної транспортної берми. Процес ковзання шматка породи по поверхні верхніх горизонтів борту кар'єру можна не розглядати, тому що в цьому випадку його швидкість і кінетична енергія будуть, як показано в попередньому параграфі, істотно менше, а значить і значення параметра  $L$  також істотно менше.

На рис. 10а,б наведено теоретичні залежності для визначення радіуса розльоту кусків породи при їх скокуванні з поверхні укосу та при їх ковзанні по поверхні укосу відповідно.

На рис. 10а,б наведено теоретичні залежності для визначення радіуса розльоту кусків породи при їх скокуванні з поверхні укосу при різних розмірах кусків породи і коефіцієнтах тертя ковчання відповідно.

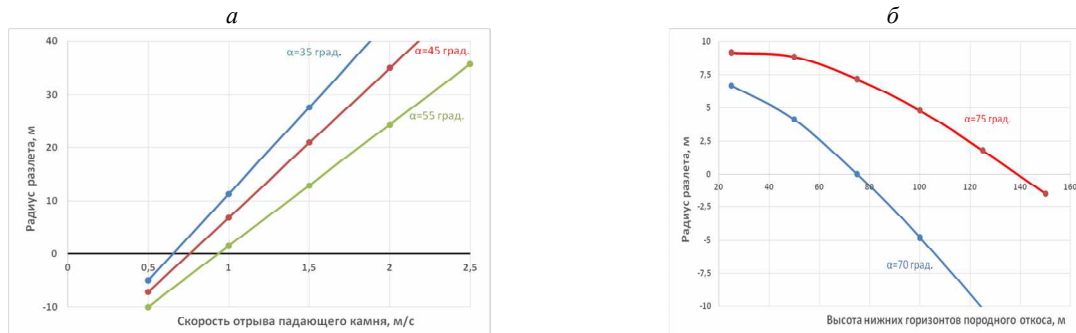


Рис. 10. Теоретичні залежності радіуса розльоту кусків породи від їх швидкості  $a$  і висоти нижніх горизонтів породного укосу  $b$  - (Негативні значення відстаней свідчать про те, що падаючий камінь не може досягти горизонтальної поверхні транспортної берми, не вдарившись о похилу поверхню нижньої групи уступів)

**Висновки.** Встановлено, що при існуючих геометричних параметрах бортів і груп уступів кар'єра №4 ПАТ «ЦГЗК», при ймовірному падінні кусків породи з верхніх горизонтів на горизонти транспортних бERM, значення радіуса їх розльоту можна очікувати в межах від 1,5 до 27,2 м, в залежності від висоти укосу і його профілю, кута нахилу і очікуваних значень коефіцієнтів тертя ковчання і ковзання кусків породи по поверхні укосів. Розроблена фізико-математична модель для визначення ймовірного радіуса розльоту кусків породи падаючих з верхніх горизонтів кар'єра №4 ПРАТ «ЦГЗК» дозволяє оцінити їх величину при таких очікуваних процесах:

- скокування або ковзання кусків породи по плоскій поверхні породного схилу;
- скокування або ковзання кусків породи по поверхні породного схилу складного профілю;
- скокування або ковзання кусків породи по поверхні породного схилу складного профілю з наступним вільним падінням;

скочування кусків породи по поверхні породного схилу складного профілю з наступним вільним падінням і непружному, нецентральному ударі об поверхню схилу нижчих груп уступів.

Виконані дослідження направлено на подальше запобігання шкоди від цих процесів і підвищення безпеки відкритих гірничих робіт.

### Список літератури

1. Розроблення фізико-математичної моделі скошування бутів гірської породи з породного відкосу висотою понад 30 м / Звіт по НДР. Док. № 8-59-19 **Наук. керівн., проф. Несмашний Є.О.** // КП «Академічний дім» АГН України. Кривий Ріг, 2019. – 67 с.
2. **Ткаченко Г.І.** Фізико-математична модель утворення поверхні зсуву в зовнішніх відвалах залізородних кар'єрів Вісник Криворізького технічного університету. - Кривий Ріг, 2011. - Вип. 28. - С. 65-70.
3. **Несмашний Е.А. и др.** Обоснование оптимальных параметров открытых горных выработок на Криворожских карьерах. - Кривой Рог, Изд-во «Дионис», - 2012, -398 с.: ил.
4. Геомеханическое обоснование параметров отвала «Западный» и его влияние на устойчивость западного борта карьера № 4 ПАО «ЦГОК» / отчет по НИР/ **рук. Несмашный Е.А.** // КП «Академический дом» АГН Украины. Кривой Рог. – 2011
5. **Несмашний Є.О.** Класична механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. Вид-во «Мінерал», Кривий Ріг, 2007. -213 с.
6. **Воронков И.М.** Курс теоретической механики. М.: Гостехиздат, 1954, -552 с.
7. **Барон Л.И.** Характеристики трения горных пород. М.: Наука, 1967, - 208 с.
8. Комп'ютерна програма для оцінки і розрахунку стійкості укосів бортів кар'єрів і ярусів відвалів «KUSTO»: Свідчення про реєстрацію авторського права на твір. Україна, МСП 03680 / **В.О.Півень, Д.М.Шпирок, О.В.Романенко, Є.Я.Бехлер, Є.О.Несмашний, О.В.Максимов, Г.І.Ткаченко.** – № 18720; Заявл. 03.10.06; Зареєстр. 22.11.06.
9. **Nesmashnyi Ye.A.,Tkachenko G.I.** «Stability evaluation of jsc "Yugok" eastern pit wall taking into account seismic mass blasting effect». Вісник Криворізького національного університету, 2017. - Кривий Ріг: .- Вип. 44. - С. 27-32.
10. **Несмашний Е.А., Герасимова Е.В., Ткаченко Г.И.** Геомеханическое обоснование устойчивых параметров отвалов карьера № 4 ПАО «ЦГОК».Вісник Криворізького національного університету. - Кривий Ріг, 2016.- Вип. 43. - С.127-132.
11. Вскрытие и разработка глубоких горизонтов карьера №4 для поддержания производственной мощности комбината (II-я очередь углубки) / Проект // Инженерно -геологические изыскания. ГП «УкрНИПИИ протехнология. -2013
12. **Szabo B.H., Lee G.C.** Derivation of Stiffness Mat-rices for Problems in Plane Elasticity by Galerkin's Method. Intern. J. of Numerical Methods in Engineering, 1, 301-310, 1969
13. **Zienkiewicz O.C.** Finite Elements in the Solution of Field Problems. The Engineer, 507-570, 1971.
14. EOTA. ETAG 027 Guideline for European technical approval of falling rock protection kits. – 2013.
15. **Gerber, W.** Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL). Guideline for the approval of rockfall protection kits / W. Gerber. – Berne: Swiss Federal Research Institute WSL Berne, 2001. – 39 с.

Рукопис подано до редакції 30.04.2020

УДК 691.32

Н. В. АСТАХОВА, канд. техн. наук, доц.  
Криворізький національний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АКТИВАЦІЇ НА ВЛАСТИВОСТІ НАПОВНЮВАЧА З ЗАЛІЗОВМІСНИХ МІНЕРАЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ

**Метою дослідження** є отримання малоцементного бетону, що має високу швидкість формування фізико-механічних властивостей, шляхом модифікації його структури активованими залізистими цеолітами мінеральними комплексами, які представляють собою систему «FeO – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> – CaO – CO<sub>2</sub>» різного ступеня дисперсності і залізосилікатним лужним колоїдним розчином.

Використовувались **методи** математичного моделювання для дослідження процесів формування структури та фізико-механічних властивостей бетонів, а також стандартні і спеціальні методи дослідження для визначення властивостей наповнювача з залізовмісних мінеральних комплексів та статистичний аналіз для обробки результатів експерименту.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає в тому, що теоретично доведена і експериментально підтверджена можливість модифікації структури бетону шляхом введення до його складу активованих залізистими цеолітами мінеральних комплексів, які представляють собою систему «FeO – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> – CaO – CO<sub>2</sub>» різного ступеня дисперсності, і залізосилікатного лужного колоїдного розчину, що призводить до збільшення ступеня і швидкості гідратації цементу, а також до підвищення його активності.

---

© Астахова Н. В., 2020