

**О.О. Фролов, д.т.н., проф.
М.І. Бельтек, студент**

*Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

Встановлення закономірностей руйнування природно порушених скельних масивів вибухом

Аналіз літературних джерел показав, що ефективність вибухового руйнування природно порушених і тріщинуватих скельних масивів залежить насамперед від міцнісних і структурних характеристик гірських порід та особливостей формування, взаємодії та поширення хвиль напружень в скельному середовищі.

Доведено, що одним з основних параметрів, який характеризує фізичні властивості скельних порід, є швидкість поширення поздовжніх хвиль напружень у гірському масиві. Тому в наведених дослідженнях зроблено припущення, що свою значимість ця характеристика середовища зберігає і в природно порушених гірських породах.

Встановлено, що значне згасання інтенсивності хвиль напружень в сильнотріщинуватих неоднорідних порушених середовищах при зменшенні розміру природних окремоостей суттєво обмежує можливість обґрунтування процесу їх руйнування на основі існуючих закономірностей поширення пружних хвиль. Це відноситься також і до розробки інженерних методів управління енергією вибуху на кар'єрах з урахуванням параметрів хвиль напружень. Однак такі ускладнення не виключають необхідності врахування хвиль напружень опосередковано, зокрема через їх швидкість поширення.

Для оцінки об'єму руйнування гірських масивів порушеної структури вибухом запропоновано використовувати швидкість поширення хвиль напружень в реальному масиві, як складової в акустичному імпедансі. Встановлено, що зі збільшенням швидкості поширення поздовжніх хвиль в природно порушеному масиві гірських порід збільшується об'єм їхнього руйнування. Доведено, що зі збільшенням швидкості поширення хвиль напружень з 1000 м/с до 6000 м/с об'єм руйнувань природно порушеного масиву збільшується в 2,2...2,4 рази залежно від типу гірської породи.

Ключові слова: природно порушений гірський масив; тріщини; вибух; гірські породи; свердловинний заряд; кар'єр.

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими практичними завданнями. Тенденції застосування вибухових робіт на відкритих гірничих роботах, що спостерігаються в останні роки, обумовлюють необхідність постійного вдосконалення техніки і технології відбивання і дроблення гірських порід вибухом. Підвищення ефективності використання енергії вибуху в тріщинуватих і порушених гірських породах має особливе значення. Якщо для монолітних гірських порід розроблено механізм їх руйнування вибухом і методи управління енергією вибуху, то для порушених гірських порід такий механізм руйнування практично відсутній [1–3]. Правильний вибір параметрів буропідричних робіт (БПР) і витрати вибухових речовин (ВР) при дробленні порушених гірських порід дозволяє покращити техніко-економічні показники технологічних процесів видобутку корисних копалин. Крім того при розробці корисних копалин відкритим способом на великих глибинах спостерігається постійне ускладнення гірничо-геологічних умов і підвищується міцність гірських порід. Тому необхідна розробка нових технологічних методів ведення вибухових робіт, особливо в природно порушених гірських породах, використання в яких загальновідомих методів управління енергією вибуху не дає надійних результатів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням механізму вибухового руйнування природно порушених та тріщинуватих скельних масивів займалося значна кількість науковців, які відмічали, що тріщинуватість гірських порід істотно впливає на результати їхнього руйнування. При цьому дроблення таких середовищ обумовлено як дією хвиль напружень, які поширюються в масиві, так і поршневою дією газів вибуху [4–11].

Основною особливістю дії вибуху в природно порушених масивах є те, що енергія хвилі напруження, при проходженні по середовищу з тріщинами, зменшується через відображення і заломлення від меж природних порушень. Водночас тиск газів вибуху, який проникає в існуючі тріщини, істотно падає, що призводить до скорочення його дії на породу і, як наслідок, погіршує руйнування [2].

Зокрема, у роботі [3, 4] зазначено, що наявність в скельному масиві тріщини шириною 2 мм, яка заповнена повітрям, знижує інтенсивність дії хвиль напружень в 25 разів порівняно з монолітним середовищем. Якщо тріщина заповнена водою, то напруження складають 0,85–0,9 від величини напружень в монолітному середовищі, тобто за наявності в тріщинах води хвиля напружень поширюється без

істотних втрат енергії. Також відмічається, що мікротріщини і площини спайності легко долаються хвилями напружень, які володіють значною енергією (потужне джерело вибуху) [5].

В той же час, окремі дослідники зазначають, що в порушеному тріщинуватому масиві дія вибуху локалізується тією природною окремістю, в якій розміщено заряд вибухової речовини. За результатами виконаних експериментальних досліджень встановлено, що в залежності від необхідного розміру допустимого шматка породи вплив тріщинуватості масиву на кінцевий результат руйнування може бути оцінений як позитивно, так і негативно [6].

Науковці в [10] зазначають, що в гірському масиві з розвинутою системою тріщин замість хвилі напружень виникає хвиля ущільнення, при поширенні якої розкриті тріщини зникають, а матеріал в них ущільнюється. При зіткненні такої ущільненої маси з окремими шматками породи, розташованими попереду фронту ущільнення, відбувається непружний удар, що подрібнює масив.

Мета дослідження. Вищенаведений аналіз літературних джерел свідчить про те, що ефективність вибухового руйнування природно порушених скельних масивів залежить насамперед від особливостей формування, взаємодії та поширення хвиль напружень в середовищі. Тому метою роботи є встановлення закономірностей впливу вибухів свердловинних зарядів ВР на процеси руйнування природно порушених гірських масивів.

Викладення основного матеріалу. Основним параметром, що характеризує фізичні властивості гірських порід, є швидкість поширення поздовжніх хвиль напружень в масиві C_p . У зв'язку з цим можна припустити, що свою інформативність ця характеристика середовища зберігає і в порушених гірських породах.

Виходячи з даного припущення, науковцями виконано експериментальні дослідження по вивченню характеру зміни швидкості поширення поздовжньої хвиль напружень у непорушених і порушених гірських масивах [1].

За результатами досліджень встановлено загальні закономірності зміни фізичних властивостей порушених гірських порід по зруйнованим вибухом породним блоками. Зокрема, отримана зміна швидкості поздовжніх хвиль в гірському масиві зі зміною порушеності масиву.

Встановлено, що в зоні активної порушеності гірських масивів, швидкість поширення поздовжніх хвиль майже залишається постійною для усіх скельних порід. Зміну швидкості поширення поздовжньої хвилі напружень в цій зоні рекомендовано визначати за формулою [1]

$$C_p = 500(1 + 3d_e), \quad (1)$$

де d_e – середнього лінійного розміру шматка підірваної гірничої маси, мм

Таким чином, на ефективність руйнування природно порушених гірських порід вибухом істотно впливає швидкість поширення хвиль напружень в реальному масиві, як складової в акустичному імпедансі. Значне згасання інтенсивності хвиль напружень в порушених середовищах при зменшенні розміру природних окремоностей значно обмежує можливість опису їх руйнування на підставі існуючих закономірностей пружних хвильових процесів. Це стосується також і розробки інженерних методів управління енергією вибуху на кар'єрах з урахуванням параметрів хвиль напружень. Однак такі ускладнення не виключають необхідності врахування хвиль напружень опосередковано, зокрема через їхню швидкість поширення.

Проведені в [4] експериментальні і теоретичні дослідження впливу гірських порід порушеної структури на параметри хвилі напружень дозволили встановити, що середня швидкість поширення поздовжніх хвиль у різноміщнісному масиві залежить, насамперед, від кількості контактів порід за міцністю, розмірів окремоностей у напрямку руху хвилі напруження. Однак, аналітична залежність між швидкістю поширення поздовжніх хвиль напружень і параметрами руйнування різноміщнісного масиву гірських порід не була встановлена.

Для встановлення об'єму руйнувань порушених скельних порід вибухом для різних значень швидкостей поширення хвиль напружень в гірському масиві використовуємо рішення просторової задачі про поширення хвиль напружень, утворених при вибуху подовжених зарядів ВР [12]. Прийнято, що природно порушений скельний масив руйнується вибухом свердловинного заряду вибухової речовини середньою щільністю заряджання 950 кг/м^3 і швидкістю детонації 3600 м/с . Діаметр свердловинного заряду ВР становить 200 мм . Свердловина має довжину 14 м .

Для встановлення закономірностей між швидкістю поширення поздовжніх хвиль напружень в гірському масиві та об'ємом руйнування природно порушеного масиву проведені розрахунки для найпоширеніших порід залізородних кар'єрів України. Потрібні для дослідження фізико-механічні властивості гірських порід запозичено з [4]. Отримані значення об'ємів руйнування природно порушених масивів гірських порід наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Розрахункові значення об'ємів руйнування природно порушених масивів гірських порід залежної від швидкості поширення повздовжніх хвиль напружень

Гірська порода	Об'єм руйнування масиву гірських порід (m^3) при швидкості поширення повздовжньої хвилі напружень (C_p), м/с					
	6000	5000	4000	3000	2000	1000
Сланець кварц-слюдистий	1087,2	1000,9	908,0	796,8	656,3	476,1
Магнетитовий кварцит	817,4	749,0	679,2	599,6	503,0	369,2
Кварц кумінгтоніто-магнетитовий	864,6	787,9	712,6	626,3	523,9	385,7
Сланець кварц-біотитовий	999,2	909,7	822,2	718,2	590,0	421,7
Кварцит безрудний	983,3	898,0	805,2	707,7	590,6	436,4
Плагіограніт, мігматит	929,5	849,1	762,3	667,3	559,1	411,7
Амфіболіти	899,0	821,8	741,5	650,4	544,1	399,5
Сланець вивітрилий	1089,4	1004,3	910,6	798,2	657,5	471,5
Кварцит залістий вивітрилий	1172,8	1083,1	981,8	860,4	710,0	508,9
Гранітоїди	1425,2	1311,2	1182,8	1032,2	849,0	602,4

Результати таблиці 1 показують, що, не дивлячись на різноманітність фізико-механічних властивостей досліджуваних гірських порід, при збільшенні швидкості поширення повздовжніх хвиль напружень в порушеному гірському масиві, тобто наближенні швидкості поширення хвиль до умов монолітного середовища, об'єм руйнування однозначно збільшується.

На підставі даних таблиці побудовані графічні залежності зміни об'єму руйнування природно порушених скельних масивів від середньої швидкості поширення хвиль напружень (рис. 1, 2). Встановлено, що зі збільшенням швидкості поширення хвиль напружень в скельному масиві з 1000 м/с до 6000 м/с об'єм руйнувань збільшується в 2,2...2,4 рази залежно від типу гірської породи. Зокрема, для магнетитового кварциту збільшення об'єму руйнування найменші (2,2 рази), а для гранітоїдів – найбільші (2,4 рази).

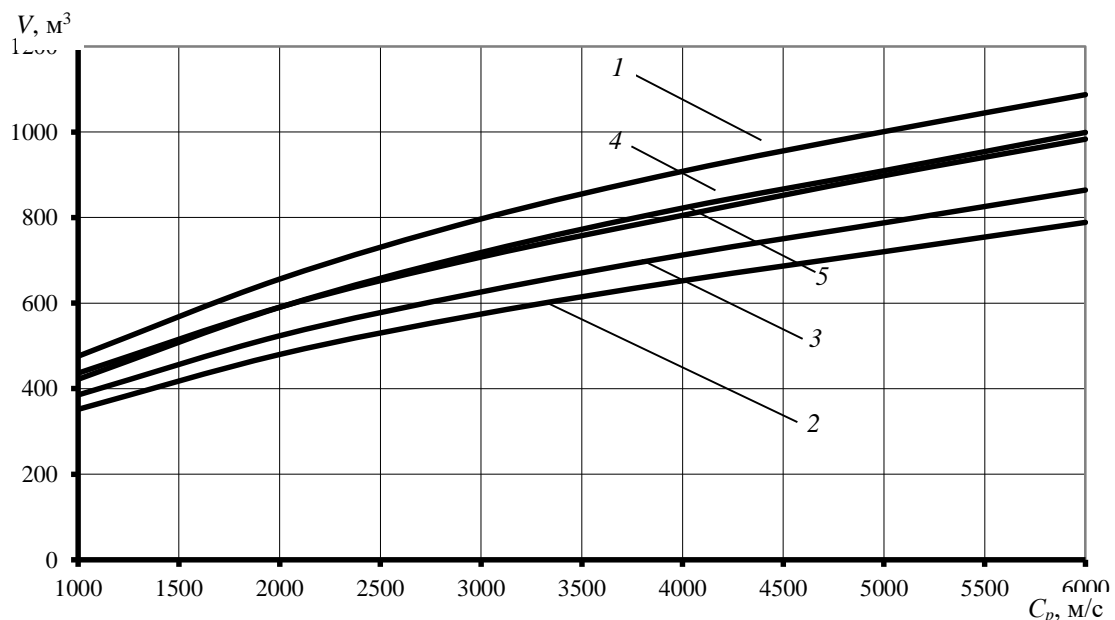


Рис. 1. Зміна об'єму руйнування масиву гірських порід V залежно від середньої швидкості поширення повздовжніх хвиль напружень C_p : 1 – сланець кварц-слюдистий; 2 – кварц магнетитовий; 3 – кварц кумінгтоніто-магнетитовий; 4 – сланець кварц-біотитовий; 5 – кварцит безрудний

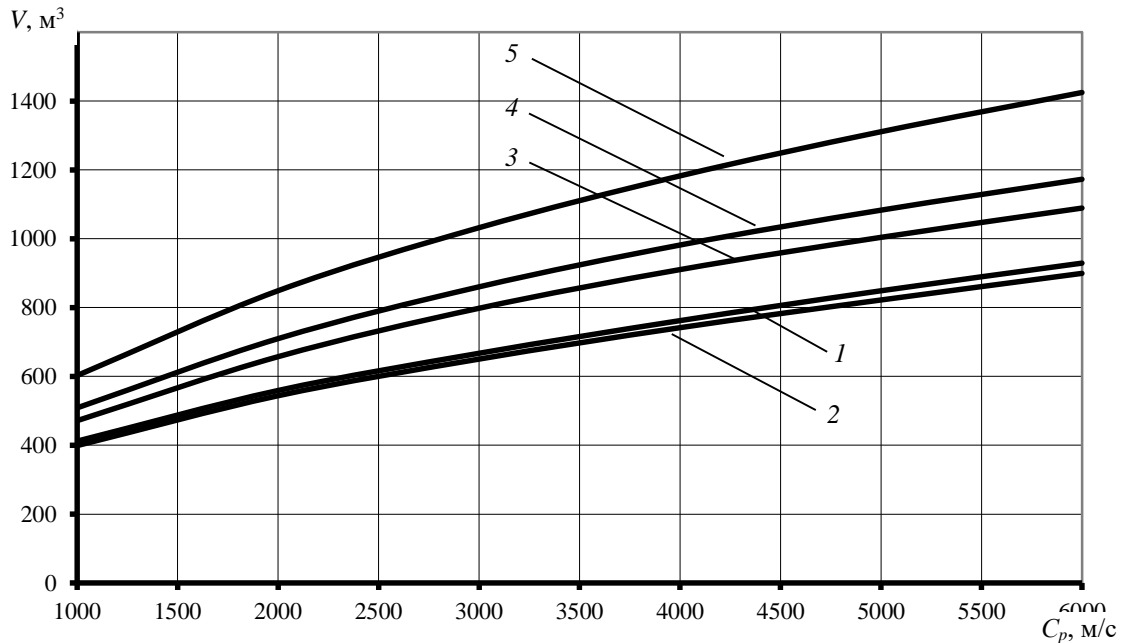


Рис. 2. Зміна об'єму руйнування масиву гірських порід V залежно від середньої швидкості поширення повздовжніх хвиль напружень C_p : 1 – плагіограніт, мігматит; 2 – амфіболіти; 3 – сланець вивітрилий; 4 – кварцит залізистий вивітрилий; 5 – гранітоїди

При цьому відзначимо, що при значенні швидкості поширення хвиль напружень 1000 м/с діапазон зміни об'єму руйнування для досліджуваних гірських масивів становить 233,2 м³ (від 369,2 м³ для магнетитового кварциту до 602,4 м³ для гранітоїдів), а при швидкості 6000 м/с цей діапазон змін дорівнює 607,8 м³ (від 817,4 м³ для кварцу магнетитового до 1425,2 м³ для гранітоїдів), тобто збільшується в 2,6 рази [13].

Графічні залежності, які представлені на рис. 2 та 3 достатньо точно можна описати поліноміальною функцією 2-го порядку:

$$V = a + bC_p - dC_p^2, \quad (2)$$

де a , b , d – емпіричні коефіцієнти поліноміальної залежності (табл. 2) [13].

Таблиця 2

Значення емпіричних коефіцієнтів поліноміальної залежності між швидкістю поширення хвиль напружень і об'ємом руйнування гірських порід

Гірська порода	Емпіричні коефіцієнти		
	a	b	d
Сланець кварц-слюдистий	290,81	0,2025	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Кварц магнетитовий	241,34	0,1417	$0,8 \cdot 10^{-5}$
Кварц кумінгтоніто-магнетитовий	253,46	0,1456	$0,7 \cdot 10^{-5}$
Сланець кварц-біотитовий	255,66	0,1825	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Кварцит безрудний	287,84	0,1625	$0,8 \cdot 10^{-5}$
Плагіограніт, мігматит	251,0	0,1541	$0,8 \cdot 10^{-5}$
Амфіболіти	260,32	0,1529	$0,8 \cdot 10^{-5}$
Сланець вивітрилий	282,28	0,2078	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Кварцит залізистий вивітрилий	304,64	0,2244	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Гранітоїди	355,02	0,2717	$1,0 \cdot 10^{-5}$

Таким чином, вищенаведені дослідження свідчать про те, що зі збільшенням швидкості поширення повздовжніх хвиль в природно порушеному масиві гірських порід (відповідно, зменшення ступені порушеності) збільшується об'єм їхнього руйнування.

Висновки та перспективи подальших досліджень. За результатами наукових досліджень встановлено, що:

– одним з основних параметрів, який характеризує фізичні властивості природно порушених гірських порід, є швидкість поширення поздовжніх хвиль напружень в масиві, що підтверджено приведеною залежністю між нею і розміром природної окремістості;

– значне зменшення параметрів хвиль напружень в сильно тріщинуватих порушених масивах виключає можливість отримання достовірних результатів при розрахунку процесу руйнування таких середовищ на основі пружних хвильових процесів. Однак це не виключає необхідності врахування хвиль напружень опосередковано, зокрема через їх швидкість поширення;

– зі збільшенням швидкості поширення поздовжніх хвиль в природно порушеному масиві гірських порід, відповідно зі зменшенням ступеню порушеності, збільшується загальний об'єм їхнього руйнування. Розрахунками отримано, що зі збільшенням швидкості поширення поздовжніх хвиль напружень з 1000 м/с до 6000 м/с об'єм руйнувань масиву вибухом свердловинного заряду ВР збільшується в 2,2...2,4 рази залежно від типу гірської породи.

Зважаючи на отримані наукові результати, перспективним є дослідження впливу типу вибухової речовини на процес руйнування природно порушених гірських масивів різних за ступенем тріщинуватості.

Список використаної літератури:

1. Мосинец В.Н. Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород / В.Н. Мосинец, А.В. Абрамов. – М. : Недра, 1982. – 248 с.
2. Моденко В.Т. Сучасний стан досліджень механізму руйнування тріщинуватих скельних гірських масивів вибухом / В.Т. Моденко, О.О. Фролов // Інноваційний розвиток гірничодобувної галузі. – Кривий Ріг : ДВНЗ «КНУ», 2017. – С. 17–18.
3. Фролов О.О. Особливості руйнування природно порушених гірських порід : матеріали V-ї всеукраїнської науково-практичної конференції «Перспективи розвитку гірничої справи та раціонального використання природних ресурсів» / О.О. Фролов, О.В. Довганюк, В.Т. Моденко. – Ж. : ЖДТУ, 2018. – С. 38–41.
4. Фролов О.О. Керування енергетичними потоками при вибуховому руйнуванні різномісних масивів гірських порід на кар'єрах : дис. ... докт. техн. наук : 05.15.03 / О.О. Фролов. – К., 2014. – 369 с.
5. Фролов О.О. Вплив межі поділу різномісних масивів гірських порід на розподіл напружень при вибуху свердловинного заряду / О.О. Фролов, Терент'єв О.М., Котенко В.В. // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2014. – № 1 (68). – С. 133–137.
6. Барон Л.И. Трещиноватость горных пород при взрывной отбойке / Л.И. Барон, Г.П. Личели. – М. : Недра, 1966. – 136 с.
7. Rock-breaking mechanism and experimental analysis of confined blasting of borehole surrounding rock / L.Changyou, Y.Jingxuan, Yu. Bin // International Journal of Mining Science and Technology. – 2017. – Issue 27. – P. 795–801.
8. Discrete element modeling of explosion-induced fracture extension in jointed rock masses / M.Lak, M.Fatehi Marji, A.R. Yarahmadi Bafghi, A.Abdollahipour // Journal of Mining and Environment. – 2019. – Vol. 10. – P. 125–138.
9. Lak M. A finite difference modelling of crack initiation in rock blasting / M.Lak, M.Fatehi Marji, A.Yarahmadi Bafghi // The 2018 World Congress on Advances in Civil, Environmental, & Materials Research (ACEM18). – Songdo Convensia, Incheon, Korea. – 2018.
10. Wang Z.L. Modelling of blast-induced fractures in jointed rock masses / Z.L. Wang, H.Konietzky // Engineering Fracture Mechanics. – 2009. – Vol. 76. – P. 1945–1955.
11. Котенко В.В. Лабораторні дослідження впливу хвиль напружень під час вибуху на параметри руйнування моделі / В.В. Котенко, О.О. Фролов // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2014. – № 3 (70). – С. 124–128.
12. Фролов О.О. Особливості розрахунку об'єму руйнування скельних порід під час вибуху свердловинного заряду з урахуванням хвиль напружень / О.О. Фролов // Вісник НТУУ «КПІ». Гірництво. – 2006. – Вип. 14. – С. 93–101.
13. Моденко В.Т. Удосконалення вибухового руйнування природно порушених масивів гірських порід на кар'єрах : дис. ... маг. 184 : спец. «Гірництво» / В.Т. Моденко. – К., 2018. – 106 с.

References:

1. Mosinec, V.N. and Abramov, A.V. (1982), *Razrushenie treshhinovatykh i narushennykh gornykh porod*, Nedra, M., 248 p.
2. Modenko, V.T. and Frolov, O.O. (2017), «Suchasnyj stan doslidzhen' mehanizmu rujnuvannja trishhynuvatykh skel'nykh girs'kykh masyviv vybuhom», *Innovacijnyj rozvytok girnichodobuvnoi' galuzi*, DVNZ «KNU», Kryvyj Rig, pp. 17–18.
3. Frolov, O.O., Dovganjuk, O.V. and Modenko, V.T. (2018), «Osoblyvosti rujnuvannja pryrodno porushenykh girs'kykh porid», *materialy V-i vseukrai'ns'koi' naukovy-praktychnoi' konferencii*, *Perspektyvy rozvytku girnicho' spravly ta racional'nogo vykorystannja pryrodnykh resursiv*, ZhDTU, Zh., pp. 38–41.
4. Frolov, O.O. (2014), «Keruvannja energetychnymi potokami pri vibuhovomu rujnuvanni riznomicnisnih masiviv girs'kih porid na kar'erah», *Diss. of dokt. tehn. nauk, spec. 05.15.03*, K., 369 p.
5. Frolov, O.O., Terent'v, O.M. and Kotenko, V.V. (2014), «Vplyv mezhi podilu riznomicnisnih masiviv girs'kih porid na rozpodil napruzhen' pri vibuhu sverdlovinnogo zarjadu», *Visnik ZhDTU. Tehnichni nauki*, No. 1 (68), pp. 133–137.
6. Baron, L.I. and Licheli, G.P. (1966), *Treshchinovatos' gornykh porod pri vzryvnoi otboike*, Nedra, M., 136 p.
7. Changyou, L., Jingxuan, Y. and Bin Yu. (2017), «Rock-breaking mechanism and experimental analysis of confined blasting of borehole surrounding rock», *International Journal of Mining Science and Technology*, Issue 27, pp. 795–801.

8. Lak, M., Fatehi Marji, M., Yarahmadi Bafghi, A.R. and Abdollahipour, A. (2019), «Discrete element modeling of explosion-induced fracture extension in jointed rock masses», *Journal of Mining and Environment*, Vol. 10, pp. 125–138.
9. Lak, M., Fatehi Marji, M. and Yarahmadi Bafghi, A. (2018), «A finite difference modelling of crack initiation in rock blasting», *The 2018 World Congress on Advances in Civil, Environmental, & Materials Research (ACEM18)*, Songdo Convensia, Incheon, Korea.
10. Wang, Z.L and Konietzky, H. (2009), «Modelling of blast-induced fractures in jointed rock masses», *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 76, pp. 1945–1955.
11. Kotenko, V.V. and Frolov, O. (2014), «Laboratorni doslidzhennya vplivu khvil' napruzhen' pid chas vibukhu na parametri ruinuvannya modeli», *Visnik ZhDTU. Tekhnichni nauki*. No. 3 (70), pp. 124–128.
12. Frolov, O.O. (2006), «Osoblivosti rozrakhunku ob'emu ruinuvannya skel'nikh porid pid chas vibukhu sverdlovinного zaryadu z urakhuvannyam khvil' napruzhen'», *Visnik NTUU «KPI» .Girnitstvo*, Issue 14, pp. 93–101.
13. Modenko, V.T. (2018), «Udoskonalennya vibukhovogo ruinuvannya prirodno porushenikh masiviv girs'kikh porid na kar'erakh», Diss. of mag. 184, spec. Girnitstvo, K., 106 p.

Фролов Олександр Олександрович – доктор технічних наук, професор кафедри геобудівництва та гірничих технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Наукові інтереси:

- буропідривні роботи на кар'єрах;
- розробка родовищ корисних копалин.

ORCID – 0000-0002-9833-6236

Бельтек Микита Ігорович – студент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Наукові інтереси:

- розробка родовищ корисних копалин.

ORCID – 0000-0002-8048-0635

Стаття надійшла до редакції 15.04.2019.