

6. Neskromnyh, V.V. (2015), "Destruction of rocks during geological exploration": Textbook, [Electronic resource], Siberian Federal University, Russia.
7. Isonkin, A.M. (2010), "The nature and degree of exposure of sludge particles of shattered rocks on the matrix of the diamond drill bit", *Rock cutting and metal working tools – machinery and technology of its manufacture and use: Sat. scientific work*, Kiev, IMS of V.N. Bakul, Ukraine, Vol. 13., pp. 182–187.
8. J. Konstanty (2000), "Diamond bonding and matrix wear mechanisms involved in circular sawing of stone", *Industrial diamond review*, no 1, pp. 55–65.
9. Zybinsky, P.V., Bogdanov, R.K., Zakora, A.P., Isonkin, A.M. (2007), "Superhard materials in exploration drilling", Nord-Press, Donetsk, 244 p.
10. Vinogradova, E.P., Zuevskaya, N.V., Kravets, V.G. (2013), "The area of indenter introduction in a block of a rock at its destruction by diamond tool": Material of the 11 School of Geomechanics: Coll. scientific.work, Gliwice, Ustron, Poland, 13 p.

Стаття надійшла 20.11.2015.

УДК 622.235

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОКАЗНИКА В'ЯЗКОСТІ СКЕЛЬНИХ ПОРІД НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКОГО МАСИВУ ВИБУХОМ

В. З. Ващук, В. Г. Кравець, О. О. Фролов

Національний технічний університет України «КПІ»
вул. Борщагівська, 115, к. 608, м. Київ, 03056, Україна.
E-mail: frolov@geobud.kiev.ua

Зазначено, що показник в'язкості скельних гірських порід залежить від параметрів пружності та критичного значення напруження руйнування на стиснення. Встановлено, що найбільш в'язкими породами з розглянутих є амфіболіт та безрудний кварцит. Проведено розрахунки по визначенню об'ємів зони руйнування для поширених скельних гірських порід та надано рекомендації щодо застосування вибухових речовин для дроблення в'язких порід вибухом за умови найбільш повного використання енергії вибуху.

Ключові слова: в'язкість, скельні породи, вибух, руйнування, вибухова речовина.

ИСЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ВЯЗКОСТИ СКАЛЬНЫХ ПОРОД НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНОГО МАССИВА ВЗРЫВОМ

В. З. Ващук, В. Г. Кравец, А. А. Фролов

Национальный технический университет Украины «КПИ»
ул. Борщаговская, 115, к. 608, г. Киев, 03056, Украина.
E-mail: frolov@geobud.kiev.ua

Отмечено, что показатель вязкости скальных горных пород зависит от параметров упругости и критического значения напряжения разрушения на сжатие. Установлено, что наиболее вязкими породами являются амфиболит и безрудный кварцит. Проведены расчеты по определению объемов зоны разрушения распространенных скальных горных пород и предоставлены рекомендации по приме-

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

нению взрывчатых веществ для дробления вязких пород при условии наиболее полного использования энергии взрыва.

Ключевые слова: вязкость, скальные породы, взрыв, дробление, взрывчатое вещество.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Скельні гірські породи в природних умовах знаходяться у складному напружено-деформованому стані, що формується під дією гравітаційних сил, геотектонічних порушень, умов насичення та геотермії [1]. Сукупність цих факторів здатна різко змінити фізико-механічні властивості порід (скельні породи з яскраво вираженим крихким руйнуванням на великих глибинах стають пластичними текучими тілами). Остання обставина різко звужує можливість вивчення властивостей гірських порід в умовах максимального наближення до природи, оскільки, по-перше, неможливо відділити зразок гірської породи з глибоких горизонтів, не спотворивши його механічних властивостей. Зняття природного поля напружень приводить до видозміни мікротріщинуватості. По-друге, усебічне моделювання глибинних процесів у лабораторних умовах неможливе, як внаслідок складності моделюваних явищ, так і в силу неповноти даних про них.

Сучасний етап розвитку видобутку та переробки скельних порід характеризується бажанням підвищити ефективність технологічних процесів за рахунок більш якісного подрібнення гірських порід. Однак, чим вище міцність порід, тим більше енергоємність їх руйнування [2]. Також на енергоємність руйнування впливають додаткові фізико-механічні властивості порід:

- в'язкість (підвищує енергоємність руйнування порід);
- крихкість (зменшує показник енергоємність руйнування);
- стисливість і пористість (збільшують втрати енергії вибуху на пластичні деформації);
- щільність (визначає витрати енергії на подолання сил інерції).

Коефіцієнт міцності за проф. Протод'яконовим для більшості петрографічних типів скельних порід в тій чи іншій мірі інтегрально враховує всі зазначені вище фізико-механічні властивості. При однаковій блоковості порід більш міцні їх різновиди руйнуються вибухом гірше, ніж менш міцні. Це правило порушується у виключних випадках при підриванні у дуже в'язких або в дуже крихких породах. В'язкі породи руйнуються значно гірше, ніж звичайні породи з однаковою міцністю, а крихкі, навпаки, подрібнюються краще звичайних порід. Граніти, габро, метаморфічні сланці, гнейси та ін. відносяться за подрібненням до нормальних порід. Для оцінки якості їх руйнування крім блоковості, необхідно і достатньо знати їх міцність. Для гірських порід з ярко вираженими в'язкими властивостями, зокрема амфіболіти, необхідно знати і враховувати при відповідних розрахунках вищезазначені так звані додаткові властивості.

Метою роботи є визначення фізико-механічних властивостей в'язких скельних порід, які впливають на ефективність їх вибухового руйнування та підбір типу вибухової речовини (ВР) для оптимізації процесу подрібнення в'язких порід.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. В'язкість скельних гірських порід можна виразити через роботу витрачену на деформацію, тобто роботу, необхідну для руйнування породи [3]. Вона залежить також від міцності і пластичності породи. Згідно [4] показник в'язкості скельних порід визначають за формулою:

$$B = K_p \sigma_c = \frac{E}{E_d} \sigma_c, \quad (1)$$

де K_p – коефіцієнт пластичності; E – модуль пружності; E_d – модуль деформації гірських порід; σ_c – критичне значення напруження руйнування порід на стиснення.

З формули (1) видно, що показник в'язкості скельних гірських порід визначається параметрами пружності та міцності. Тому для встановлення впливу в'язкості на руйнування скельних порід вибухом можна скористатися пружною теорією руйнування.

Для розв'язання просторових задач про поширення хвиль напружень в скельному гірському масиві, утворених при вибуху подовжених зарядів ВР, пропонується розрахункова схема, в якій хвильові рівняння руху середовища мають вигляд [5]:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c_l^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \Phi(r, z, t) &= 0; \\ \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c_t^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \Psi(r, z, t) &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

де r – радіальна координата; z – осьова координата; t – час; c_l – швидкість поширення поздовжніх хвиль в масиві гірських порід; c_t – швидкість поширення поперечних хвиль в масиві гірських порід; $\Phi(r, z, t)$, $\Psi(r, z, t)$ – хвильові потенціали напруження та зміщення повздовжньої та поперечної хвиль.

При відомих потенціалах можна визначити напруження в будь-якій точці масиву:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = 2\mu \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r \partial z} \right) + \frac{\lambda}{c_l^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}; \\ \sigma_{zz} = 2\mu \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r \partial z} \right) + \frac{\lambda}{c_l^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}; \\ \sigma_{rz} = 2\mu \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r \partial z} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right) + \rho \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}, \end{cases} \quad (3)$$

де ρ – щільність гірської породи; λ , μ – коефіцієнти Ляме:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}; \quad \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)},$$

де E – модуль пружності; ν – коефіцієнт Пуассона.

Маючи початкові і граничні умови [6], отримаємо задачу Коші. Для розв'язання вищенаведених гіперболічних диференціальних рівнянь використовуємо різницеву схему рішення, а для отримання чисельних результатів при розв'язанні таких просторових задач застосовуємо чисельний метод сіток, що прийнятий при визначенні напруженого стану масиву гірських порід, утвореного вибухом подовженого заряду [7].

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

Порівнюючи розраховані напруження, які утворюються при вибуху свердловинного заряду ВР, з межею міцності даної породи на стиснення, розтягнення або зсув можна встановити можливість руйнування гірського масиву.

У відповідності до наведених вище теоретичних положень розроблено алгоритм визначення розмірів та форми зони руйнування при підриванні свердловинного заряду ВР в скельному масиві гірських порід та програма розрахунку значень радіусу зони руйнування по глибині свердловини з визначенням об'єму подрібненої породи. За результатами розрахунків в досліджуваному об'ємі гірського масиву формується просторове поле напружень.

Оскільки гірський масив розбито на елементарні об'єми зі стороною 0,1 м, то напруження в кожному такому об'ємі порівнюються з межею міцності (критичними напруженнями) гірської породи на розтягнення, стиснення та зсув. Якщо в певний момент часу розрахункові напруження будь-якого елементарного об'єму перевищують межу міцності на розтягнення, стиснення або зсув, то цей об'єм гірської породи буде вважатися зруйнованим. Після виконаних порівнянь зруйновані елементарні об'єми гірського масиву підсумовуються і отримується загальний об'єм руйнування, а за граничним розташуванням зруйнованих елементарних об'ємів встановлюється просторова геометрія зони руйнування.

На рис. 1 наведено вихідні дані для розрахункової програми з визначення об'єму, розмірів та форми зони руйнування скельного масиву гірських порід вибухом подовженого циліндричного заряду ВР.

Параметри свердловинного заряду ВР, що використовувалися при розрахунках наступні: довжина свердловини – 15 м; діаметр заряду ВР – 200 мм.

| Параметры сетки | | Параметры скважины | |
|--------------------------------|---------|-----------------------------|-----------|
| Разбиение, м | 0,1 | Глубина, м | 15 |
| Шагов по длине iCount | | Радиус, м | 0,1 |
| Длина исследуемого объёма, м | 20 | Продолжительность взрыва, с | 0,00003 |
| Шагов по глубине zCount | | Начальное давление, МПа | 145000000 |
| Глубина исследуемого объёма, м | 20 | | |
| Квант времени, с | 0,00001 | | |

| Параметры породы | | | |
|---------------------|------------|-------------|--------|
| ν | 0,09 | $\tau_{кр}$ | 110000 |
| E | 4600000000 | C_L | 4350 |
| $\sigma_{t, кр}$ | 9900000 | C_T | 3200 |
| $\sigma_{с, кр}$ | -52000000 | ρ | 2690 |
| λ LamLambda | | μ LamMu | |

| Гидростатическое давление | | Затухание | |
|---------------------------|----------------------|-------------------|-----------|
| Растягивающие напряжения | Сжимающие напряжения | Степень затухания | |
| Кoefficient | Степень h | Кoefficient | Степень h |
| 26900 | 2,5 | -26900 | 2,5 |
| | | | 1,1 |

Рисунок 1 – Розрахункові параметри для визначення об'єму та розмірів зони руйнування масиву гірських порід вибухом подовженого циліндричного заряду

Для поширених скельних гірських порід кар'єрів України в табл. 1 наведено їх основні фізико-механічні властивості та визначені показники в'язкості. Згідно отриманих даних, найбільш в'язкими породами є амфіболіт та безрудний кварцит. При наведених вище параметрах свердловинного заряду, визначені об'єми зон руйнування.

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

Графіки зміни радіуса зони руйнування R по глибині свердловини H при подрібненні амфіболітів для різних типів промислових ВР наведено на рис. 2.

Таблиця 1 – Основні фізико-механічні властивості скельних гірських порід

| Назва породи | ρ , кг/м ³ | σ_p , МПа | σ_c , МПа | c_t , м/с | E , ГПа | ν | E_d , ГПа | K_p | B |
|-------------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------|-------------|--------------|-------|----------------|-------|--------|
| Граніт | 2690 | 4,5 | 52 | 4350 | 46 | 0,09 | 8,07 | 5,7 | 296,4 |
| Сланці | 2870 | 9,9 | 88 | 2250 | 74 | 0,12 | 13,28 | 5,57 | 498,5 |
| Амфіболіт | 3025 | 16,2 | 91 | 6388 | 82 | 0,23 | 7,88 | 10,4 | 943,3 |
| Піщаник | 2460 | 10,7 | 106,5 | 2100 | 31 | 0,19 | 10,44 | 2,97 | 316,3 |
| Кварцит безрудний | 2840 | 12,8 | 130 | 5600 | 64 | 0,22 | 9,01 | 7,01 | 911,3 |
| Вапняк | 2730 | 15,6 | 143 | 4300 | 09 | 0,3 | 2,64 | 3,4 | 489 |
| Мармур | 2350 | 14,0 | 170 | 4950 | 40 | 0,12 | 23,5 | 1,7 | 289,1 |
| Магнетитовий кварцит | 3470 | 20,8 | 210 | 5409 | 83 | 0,26 | 27,9 | 2,98 | 625 |
| Габро | 3005 | 24,8 | 220 | 6250 | 71 | 0,33 | 31,4 | 2,26 | 498,5 |
| Залізистий кварц | 2800 | 16,2 | 280 | 5400 | 41 | 0,16 | 16,4 | 2,5 | 700 |
| Лабрадорит | 2700 | 18,0 | 165 | 4850 | 88 | 0,28 | 26,1 | 3,38 | 557,75 |

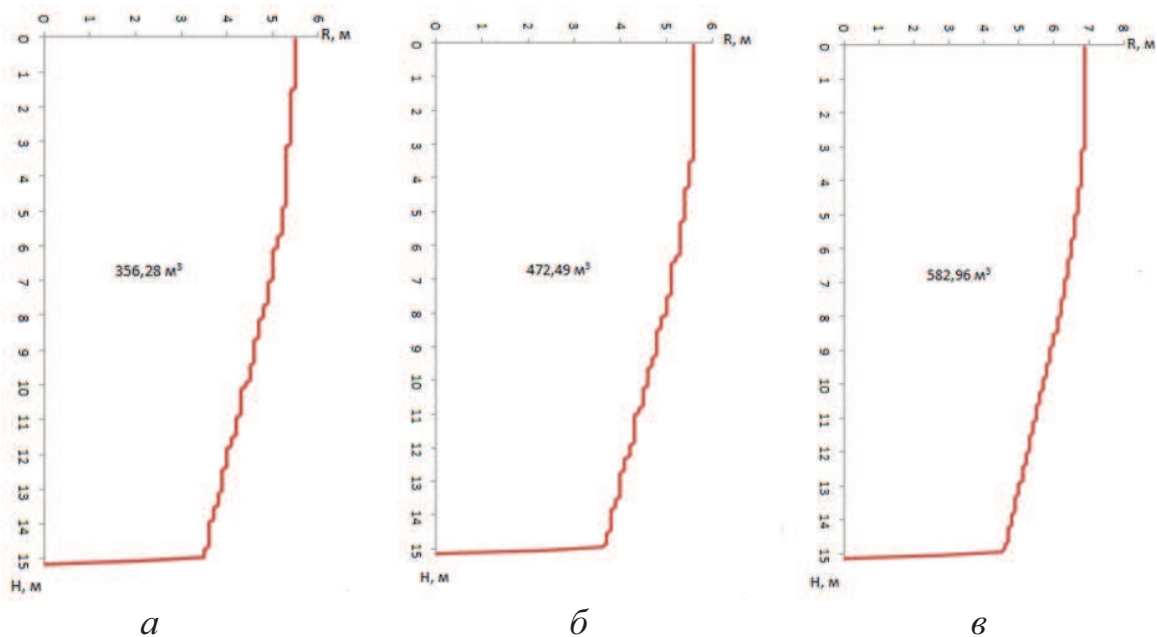


Рисунок 2 – Графіки зміни радіуса зони руйнування R по глибині свердловини H при подрібненні амфіболітів: *a* – ігданітом; *б* – грамонітом; *в* – анеміксом

На рис. 3 представлено результати розрахунку об'ємів руйнування скельних порід, наведених у табл. 1. із застосуванням ігданіту, грамоніту 79/21, анеміксу 70). Згідно отриманих даних найбільший приріст об'єму руйнування при застосуванні анеміксу 70 в порівнянні з грамонітом 79/21 спостерігається для найменш в'язких порід, зокрема, граніту. Найменший приріст спостерігається для об'єму руйнування для найбільш в'язкої породи – амфіболіту.

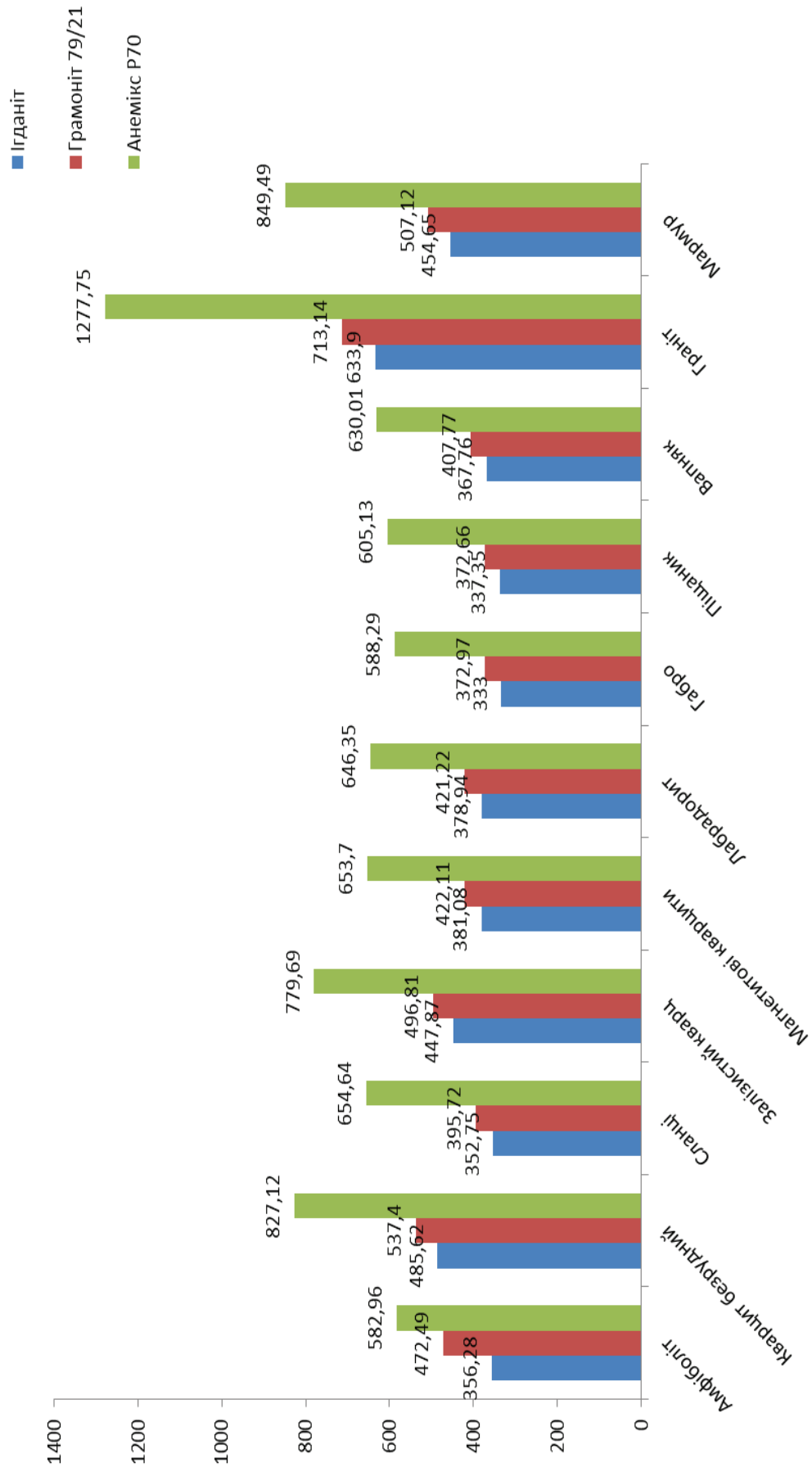


Рисунок 3 – Гістограма об'ємів руйнування скельних порід із застосуванням різних типів ВР

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

ВИСНОВКИ. Відповідно до результатів досліджень, встановлено, що:

- показник в'язкості скельних гірських порід визначається параметрами пружності та міцності;

- найбільш в'язкими породами є амфіболіт та безрудний кварцит;

- для найбільш повного використання енергії вибуху при руйнуванні в'язких порід вибухом найкраще використовувати ВР типу ігданіт, оскільки приріст об'ємів руйнування амфіболіту при використанні Анемікс 70 (582,96 м³) складає всього на 23 % більше в порівнянні з грамонітом 79/21(472,49 м³) та 45 % в порівнянні з ігданітом, а для порівняння приріст об'єму крихких порід (граніту) становить 79 % в відношенні Анеміксу 70 до грамоніту 79/21 та 90 % при відношенні Анеміксу до ігданіту(356,28 м³);

- отримані результати можуть бути використані при виборі типу ВР на кар'єрах, що розробляють в'язкі скельні породи.

Дослідження в цьому напрямку є перспективними, оскільки мають безумовну практичну цінність для виробників.

ЛІТЕРАТУРА

1. Михалюк А.В. Горные породы при неравномерных динамических нагрузках. – Киев: Наук. думка, 1980. – 100 с.

2. Власов О.Е., Смирнов С.А. Основы расчета дробления горных пород взрывом. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 256 с.

3. Шахтное и подземное строительство. Учебник для ВУЗов. 2-е издание. / Б.Л. Картозия, Б.И. Федунец, М.Н. Шуплик, Ю.Н. Малышев, В.И. Смирнов, В.Г. Лернер и др. – М.: Издательство Академии Горных Наук, 2001. – 658 с.

4. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1978. – 390 с.

5. Разрушение горных пород энергией взрыва / Под ред. Э. И. Ефремова. – Киев: Наук. думка, 1987. – 264 с.

6. Фролов О.О. Особливості розрахунку об'єму руйнування скельних порід під час вибуху свердловинного заряду з урахуванням хвиль напружень // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Гірництво": Зб. наук. праць. – К.: НТУУ "КПІ". – 2006. – Вип. 14. – С. 93–101.

7. Фролов О.О. Керування енергетичними потоками при вибуховому руйнуванні різноміцнісних масивів гірських порід на кар'єрах / Дис. ... докт. техн. наук: 05.15.03. – К., 2014. – 369 с.

8. Ващук В.З., Фролов О.О. Обґрунтування вибору вибухової речовини для руйнування в'язких скельних гірських порід: Сборник научных трудов VII Международной научно-технической конференции «Энергетика. Экология. Человек» молодых ученых, аспирантов и магистрантов, 27-29 мая 2015 года. Киев / Перспективы развития горного дела и подземного строительства. – Киев: УВОІ «Допомога» УСІ», 2015. – 168–171 с.

STUDY OF INFLUENCE VISCOSITIES OF ROCK DESTRUCTION EFFICIENCY FOR ROCK MASS EXPLOSION

V. Vashchuk, V. Kravets, O. Frolov

National Technical University of Ukraine «KPI»

vul. Borschagivska, 115, 608 k., Kyiv, 03156, Ukraine.

E-mail: frolov@geobud.kiev.ua

Purpose. Determining the physical and mechanical properties of viscous rock, which affect the effectiveness of the explosive destruction and selection of the type of explosive to optimize the grinding process viscous rocks. **Methodology.** The solution of the tasks carried out by analyzing and summarizing the achievements of the theory and practice of blasting, considering the current state of destruction viscous rock explosion. We used the methods of analysis, comparison, methods of elasticity theory, observation and experiment. **Results.** It is found that the viscosity index of rock is determined by parameters of elasticity and strength. The most viscous rocks are amphibolites and nonmetallic quartzite. To take full advantage of the explosion energy in the destruction of rocks by explosion viscous better use of explosives such as igdanit as gain in the destruction of amphibolites compared with anemiks is the best. **Originality.** The method of calculation of viscous rock destruction of rocks by explosion, taking into account stress waves are recorded as rock properties and downhole parameters explosive charge. **Practical value.** The results can be used when choosing the type of explosives in quarries, developing knitting rocks. References 8, tables 1, figures 3.

Key words: viscosity, rocks, explosion, crushing, explosive.

REFERENCES

1. Myhaljuk, A.V. (1980), *Gorny porody pry neravnomerny dynamycheskyh nagruzkah* [Rocks in the uneven dynamic loads], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine.
2. Vlasov, O.E., Smyrnov, S.A. (1962), *Osnovy rascheta droblenija gornyh porod vzryvom* [Fundamentals of calculating rock crushing blast], AN SSSR, Moscow, Russia.
3. Kartozyja, B.L., Fedunec, B.Y., Shuplyk, M.N, Malyshev, Ju.N., Smyrnov, V.Y., Lerner, V.G. (2001), *Shahtnoe y podzemnoe stoytel'stvo. Uchebnyk dlja VU-Zov*, [Shahtnoe podzemnoe and construction. Textbook for high schools.], Publisher Academy of Mining Sciences, Moscow, Russia.
4. Rzhavskij, V.V., Novyk, G. Ja. (1978) *Osnovy fyzyky gornyh porod* [Basics of rock physics], Nedra, Moscow, Moscow, Russia.
5. Efremov, E.Y. (1987), *Razrushenye gornyh porod energyej vzryva* [Destruction of rocks by explosion energy], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine.
6. Frolov, O.O., (2006), "Features of calculating the amount of destruction of rocks in the blast hole charges taking into account the stress waves", *Visnyk NTUU "KPI". Serija "Girnyctvo"*, vol. 8, no. 14, pp. 93–101.
7. Frolov, O.O. (2014) "Management of power flows in the explosive destruction ryznomitsnisnyh arrays rocks in quarries", Thesis abstract of Dr.Sc. (Engineering). 05.15.03, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.
8. Vashhuk, V.Z., Frolov, O.O., (2015), "Rationale for the explosive to destroy viscous rock", *Perspektivy razvitija gornogo dela i podzemnogo stroitel'stva. VII Mezhdunarodnja nauchno-tehnicheskja konferencija «Jenergetika. Jekologija. Chelovek» molodyh uchenyh, aspirantov i magistrantov.* [Prospects for the development of mining and underground construction. VII International Scientific Conference "Energy. Ecology. Man "of young scientists, graduate students and undergraduates], Kyiv, NTUU "KPI", May 27-29, 2015, pp. 168–171.

Стаття надійшла 24.11.2015.