

происходит перераспределение статических напряжений и в призабойной области массива возникает непосредственно примыкающая к плоскости забоя зона неравнокомпонентного напряженного состояния (зона пластических деформаций растяжения), которая переходит в зону сжатия (естественное напряжённое состояние массива).

Также, определено, что вариации подстановки: коэффициента Пуассона, модуля Юнга, плотности, крепости горных пород и ихнего объёмного веса, не дают значительных изменений в измерениях размера зоны разгрузки, поскольку все получаемые данные схожи между собой и имеют незначительные колебания значений. Установлено, что изменения глубины заложения, размера сечения и коэффициента бокового распора оказывают основное влияние на размер зоны и тем самым являются основными факторами, влияющими на неё.

### Список использованных источников

1. Борисов, А.А. Механика горных пород и массивов [Текст] / А.А. Борисов. – Москва: Недра, 1980. – 360 с.
2. Лукьянова, А.Н. Моделирование контактной задачи с помощью программы ANSYS [Текст] / А.Н. Лукьянова. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 52 с.
3. Заславский, Б.Б. Краткий курс сопротивления материалов [Текст] / Б.Б. Заславский. – Москва: Машиностроение, 1986. – 328 с.
4. Работнов, Ю.Н. Сопротивление материалов [Текст] / Ю.Н. Работнов. – Москва: Физматгиз, 1963. – 456 с.
5. Малахов, Г.М. Управление горным давлением при разработке рудных месторождений Криворожского бассейна [Текст] / Г.М. Малахов, М.В. Гуминский. – Киев: Наук. Думка, 1990. – 204 с.
6. Глушков, В.Т. Инженерно-геологические особенности железорудных месторождений [Текст] / В.Т. Глушков, В.Г. Борисенко. – Москва: Недра, 1978. – 253 с.

*Статья поступила в редакцию 11.08.2016 г.*

УДК 622.236.9

**Ю.І. Войтенко**, д.т.н., головний наук. співробітник (Український державний геологорозвідувальний інститут), **А.М. Шукуров**, аспірант (НТУУ «КПІ»)

### ПРО ЕНЕРГОЄМНІСТЬ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ТА ШЛЯХИ ЇЇ ЗМЕНШЕННЯ

**Yu.I. Voitenko** (Ukrainian State Geological Prospecting Institute), **A.M. Shukurov**

## ABOUT ENERGY INTENSITY FRACTURE OF ROCKS AND WAYS ITS REDUCTION

*На основі теорії міцності ідеально-періодичних структур і механіки крихкого руйнування розглянуто фізичні основи розміцнення крихких гірських порід вибуховим та фізико-хімічними способами. Показано вплив кількості мікро та макротріщин та їх розмірів на величину зниження міцності в зонах розміцнення в комбінованих методах руйнування.*

**Ключові слова:** енергія; руйнування; тріщина; стиснення; зсув; розрив; кумулятивний заряд.

*На основе теории прочности идеально-периодических структур и механики хрупкого разрушения рассмотрены физические основы разупрочнения хрупких горных пород взрывным и физико-химическими способами. Показано влияние количества микро и макротрещин и их размеров на величину снижения прочности в зонах разупрочнения в комбинированных методах разрушения.*

**Ключевые слова:** энергия; разрушение; трещина; сжатие; сдвиг; разрыв; кумулятивный заряд.

*The purpose of this work - to determine the effect of the amount and spatial distribution of micro and macrocracks in the area of loads on the destruction and selection of the most promising methods for creating spatial ensembles cracks and methods to reduce the specific surface energy.*

*Based on the theory of strength perfectly periodic structures and mechanics of brittle fracture reviewed the physical basis strength reduction brittle rock blasting, and physico-chemical methods. The influence of the number of micro and macro cracks for reduction of strength a combined methods of fracture is researched.*

*Ways to reduce the strength of rocks and building materials shown in real materials and industrial objects: in reinforced concrete storage and rocks of oil and gas reservoirs.*

**Keywords:** energy; fracture; crack; compression; shear; rupture; shaped charge.

**Актуальність роботи.** Проблема зниження енергоємності виробництва є загальною для геологорозвідувальної, нафтогазової та гірничовидобувної галузей.

Серед технологічних процесів гірничого виробництва та геологічної розвідки, при розробці родовищ корисних копалин методами свердловинних геотехнологій буріння є однією з найбільш енергоємних стадій геологорозвідувальних робіт та видобутку. Враховуючи те, що геологорозвідувальні роботи та видобуток корисних копалин забезпечують енергетичну та економічну незалежність країни за рахунок забезпечення внутрішніх потреб та експортного потенціалу, даний напрямок досліджень є безперечно актуальним.

Складовими витрат енергії в геологічній розвідці та видобуванні корисних копалин є:

- витрати на спорудження геологорозвідувальних свердловин, особливо на нафту і газ, в перспективі геотермальних свердловин, глибиною до 7 – 10 км;
- витрати на буріння експлуатаційних свердловин (переважно для видобутку нафти і газу), зарядних свердловин для вибухового первинного руйнування гірських порід при відкритій та підземній розробці родовищ

корисних копалин, витрати на гідророзрив пласта (ГРП) або інші способи інтенсифікації нафто газовидобутку або інтенсифікації видобутку при підземному вилуговуванні металів;

- витрати на розкривні роботи [1];
- витрати на вторинне дробіння та переробку подрібнених порід в технологічних комплексах (дробарках);
- витрати на підземне або кучне вилуговування.

При цьому витрати безпосередньо на спорудження свердловин (без вартості матеріалів) складають не менше, ніж 60-90% загальної вартості свердловини за винятком нетрадиційних родовищ нафти і газу, де ця частка не перевищує ~25-50%. Тому зменшення енергоємності буріння, збільшення його швидкості на ~ 5-15% принесе не лише значну економію енергії та ресурсів, а й зменшить навантаження на докілья. Крім того, заміна ГРП на його імпульсні аналоги та менш енергоємні технології вирішує ті ж самі задачі.

**Мета роботи** – визначити вплив кількості та просторового розподілу мікро- і макротріщин в зоні дії навантажень на енергоємність руйнування та виділення найбільш перспективних методів створення просторових ансамблів тріщин і методів зниження питомої поверхневої енергії.

**Результати досліджень.** Відомо, що витрати енергії на руйнування твердого тіла пропорційні квадрату його міцності. Тому основні чинники, які впливають на енергоємність руйнування – міцність в класичному її розумінні у феноменологічних теоріях міцності на стиснення  $\sigma_c$  та на розрив  $\sigma_p$ ; в'язкість руйнування або тріщиностійкість при розтягу, поперечному та поздовжньому зсувах  $K_{Ic}$ ,  $K_{IIc}$ ,  $K_{IIIc}$  в мікродфектних теоріях міцності; гірничо-технічний коефіцієнт міцності за шкалою проф. М.М. Протодьяконова в гірничій справі.

З механіки гірських порід відомо, що міцність на розрив  $\sigma_p$  переважної більшості гірських порід менша на порядок ніж міцність на стиснення  $\sigma_c$  [2].

$$\sigma_c / \sigma_p \simeq 8 \dots 12$$

Крім того,  $K_{IIc} > K_{Ic}$ ,  $K_{IIIc} > K_{Ic}$ . Тобто, руйнування на розрив енергетично набагато вигідніше, ніж стиснення (роздавлювання) та зсув [2]. Оскільки при бурінні переважно реалізується процес різання або зсувного руйнування, то умова руйнування згідно Треска має вигляд:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \geq [\tau], \quad (1)$$

де  $\tau_{\max}$  – критичне напруження зсуву;  $[\tau]$  – міцність на зсув, значення якої проміжні між  $\sigma_c$  та  $\sigma_p$ ;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  – головні напруження, які характеризують напружено-деформований стан (НДС) породи поблизу бурового долота.

Наявність природних тріщин або створення їх в нано-, мікро- та макромасштабах ефективно знижує міцність на розрив та зсув. Так, теоретичну міцність ідеально-періодичних кристалічних структур можна оцінити за формулами Я. Френкеля, А. Гріффітса та Дж. Гілмана [3].

$$\tau_{\max} = \frac{G\epsilon_0}{2\pi a_0}, \quad \sigma_{\max} = \lambda\sqrt{E\gamma/a_0}, \quad \sigma = \frac{E\epsilon_0}{\pi a_0} \sin \frac{\pi\nu}{\epsilon}, \quad (0 \leq \nu < \epsilon_0), \quad (2)$$

де  $a_0$  – відстань між півпросторами, які зміщуються (між рядами атомів);  $\epsilon_0$  – період кристалічної решітки;  $E, G$  – модулі Юнга та зсуву,  $\gamma$  – питома поверхнева енергія руйнування (ППЕ).

Теоретична міцність згідно цим формулам на зсув для ідеальної гранецентрованої кубічної решітки ( $a_0 = \epsilon_0 \sqrt{2}$ )  $\tau_{\max} \sim 0,1G$ ; на розрив –

$$\sigma_{\max} = \frac{E\epsilon_0}{\pi a_0} = \frac{E}{\sqrt{2\pi}}.$$

В реальних середовищах ніколи не спостерігаються такі значення міцності через наявність дефектів в кристалічній решітці, нано-, мікро- та макротріщин у відповідних об'ємах [3, 4]. Для пісковика міцного теоретична міцність на зсув  $\tau_{\max} \sim 1,3 - 4,2$  ГПа, на розрив  $\sigma_{\max} \sim 6,8...21,5$  ГПа. Значення міцності на розрив реальних гірських порід, в тому числі пісковика міцного, на три порядки менші, ніж значення теоретичної міцності.

Поява тріщиноподібних дефектів (мікро- та макротріщин) довжиною  $l$  зменшує міцність на розрив у разі крихкого руйнування до величини, яка визначається за формулою Гріффітса

$$\sigma = \lambda\sqrt{E\gamma/l} \quad (3)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт, що відповідає за вид НДС (тонка пластина, або плоский напружений стан,  $l$  – довжина мікро- чи макротріщини).

Враховуючи, що  $\lambda = \sqrt{2/\pi}$  для плоского напруженого стану або  $\lambda = \sqrt{2/\pi(1-\nu^2)}$  для плоскої деформації ( $\nu$  – коефіцієнт Пуассона) [2,3], знайдемо, що для пісковика з  $E = 95$  ГПа,  $\sigma_c = 137$  МПа,  $\sigma_p = 9,7$  МПа,  $K_{Ic} = 1,47$  МПа,  $\gamma = 11,37$  Дж/м<sup>2</sup>.

Розрахунок питомої поверхневої руйнування  $\gamma$  проводився за формулою [3]

$$\gamma = K_{Ic}^2/2E. \quad (4)$$

Тоді за формулою (3) знайдемо для різних значень довжини початкових тріщин значення критичного навантаження, а – фактично міцності пісковика з тріщиною різної довжини (табл. 1). Як видно з цих даних міцність на розрив пісковика визначається розміром зерна  $\sim 10^{-3}$  м (експериментальне значення

$\sigma_p = 9,7$  МПа) і роль початкових дефектів відіграють міжзернові контакти, або пори між зернами.

Тріщиноподібні дефекти меншого розміру будуть впливати на міцність породи, якщо їх буде багато – періодична або хаотична система дефектів [3].

В будь-якому випадку збільшення розмірів початкових тріщин та їх кількості призводить до зниження міцності породи. Крім того, зменшити її можна, зменшуючи величини  $E$  та  $\gamma$ .

Таблиця 1

Залежність критичного напруження від розміру дефекту за Гріффітсом

№ п/п	$l, м$	$\sigma, МПа$
1	$10^{-6}$	832,5
2	$10^{-5}$	263,1
3	$10^{-4}$	83,25
4	$10^{-3}$	26,31
5	$10^{-2}$	8,33

Давно відомий факт, що вода та розчини поверхнево-активних речовин зменшують міцність та тріщиностійкість ряду порід (ефект Ребіндера), а кислотні розчини – аналогічні характеристики карбонатних, карбонатизованих та силікатних порід [4]. До нетрадиційних реагентів, які активно впливають на фізико-механічні характеристики, в тому числі міцність гірських порід, а також металів, треба віднести атомарний і молекулярний водень [5]. До традиційних можна віднести вибухові навантаження та інші види механічної, фізичної та хімічної дії на породу, яку необхідно зруйнувати. Із них найбільш ефективні комбіновані методи розміщення та руйнування порід (рис. 1) [6]. Деякі із механічних методів руйнування по суті також є комбіновані:

- ударно-обертовий;
- обертовий з додатковою ударною обробкою металічними (чавунними) дробинами;
- обертовий з гідро кавітаційною обробкою;
- вибухово-механічний.

Граф з не строго паралельними дугами (ГЗНПД – рис. 1а) відповідає комбінованим способам, для яких не важлива послідовність прикладення навантаження. У графі зі строго паралельними дугами (ГЗСПД – рис. 1б) важлива послідовність прикладення навантаження. З ГЗНПД отримано комбінацій: 72 парних (представлені відрізками) та 576 потрійних способів навантаження (представлені трикутниками). З ГЗСПД отримано комбінацій: 144 парних (півдуга між двома вершинами) та 5184 потрійних навантажень (три півдуги з'єднаних трьома вершинами) [6].

Порівняльний аналіз значень енергоємностей найбільш поширених одиничних та комбінованих способів руйнування гірських порід наведено у табл. 2. Як впливає з аналізу даних табл. 2, енергоємність руйнування гірських порід знижується за рахунок застосування комбінованих та імпульсних навантажень шляхом створення систем тріщин, або зниження ППЕ.

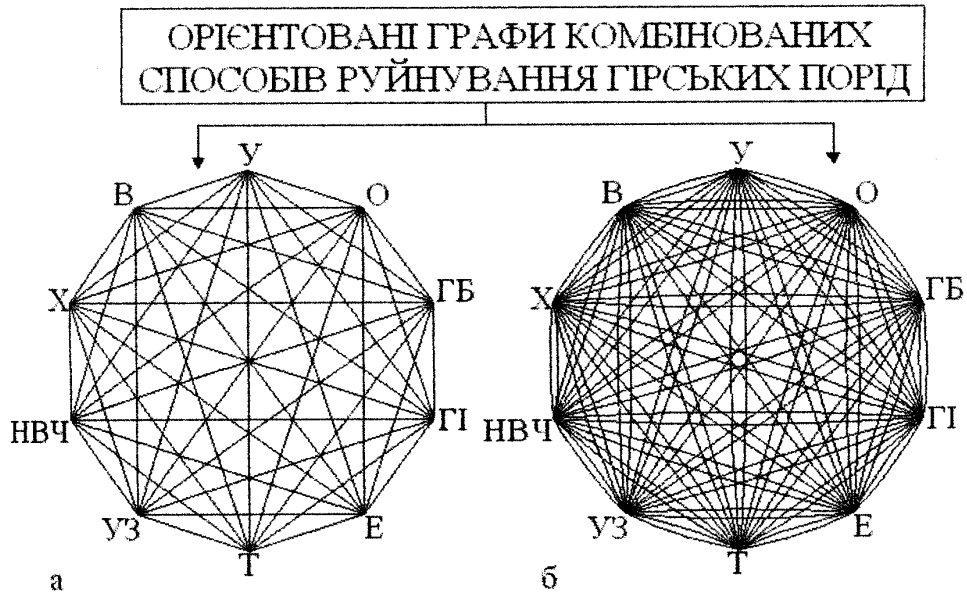


Рис. 1. Орієнтовані графи комбінованих способів руйнування гірських порід за видом навантаження на гірську породу[6]:

У – ударні, О – обертові, ГБ – гідравлічні безперервні, ГІ – гідравлічні імпульсні, Е – електричні, Т – термічні, УЗ – ультразвукові, НВЧ – надвисокочастотні, Х – хімічні, В – вибухові

В роботі [6] для розміцнення породи на вибої свердловини використано кавітацію в промивальній рідині. Спосіб дозволяє активізувати енергетичний потенціал потоку промивної рідини при кавітації магнітною активацією. За рахунок енергії схлопування кавітаційних бульбашок відбувається створення штучної тріщинуватості та ініціювання поширення природної. У сукупності вони формують зону передруйнування [6]. Потужний вплив кавітації на процес деформування пластини вибухом заряду в рідині встановлено М.А. Лаврентьєвим в експериментах, та його послідовниками в теорії [7]. При певних відстанях від заряду до пластини центральна її частина деформується в сторону не від заряду, а до заряду.

Таблиця 2

Порівняльний аналіз значень енергоємностей одиничних та комбінованих способів руйнування гірських порід [6]

Одиничний спосіб навантаження	Середня енергоємність руйнування, МДж/м <sup>3</sup>	Комбінований спосіб навантаження	Середня енергоємність руйнування, МДж/м <sup>3</sup>
Ударний	420	Ударно-обертовий	500
Обертовий	750		
Гідравлічний	1500	Гідроімпульсний	100
		Електрогідравлічний	450
Електротермічний	5000	Електроімпульсний	150
		Електротермомеханічний	650
		Термомеханічний	1400

На рис. 2 показано вид поверхні зразка граніту після магнітогідрокавітаційної обробки. Видно утворення численних мікротріщин на поверхні зразка [6].



Рис. 2. Фото зразка граніту після обробки магнітогідрокавітаційним навантаженням [6]

В роботі [5] показано вплив попередньої обробки воднем на руйнування карбонатної породи в процесі механічних випробувань на стиснення. Показано, що насичення молекулярним та атомарним (гарячим) воднем призводить до більш інтенсивного руйнування породи при механічному навантаженні тієї ж інтенсивності. Механізми впливу водню на процес розміцнення такі:

- тиск молекулярного водню в мікропорожнинах;
- обумовлена воднем декогезія (ослаблення міжатомного зчеплення) в кристалічній решітці матеріалу (зменшення ППЕ);
- взаємодія атомів водню в матеріалі з дислокаціями;
- хімічна взаємодія водню з компонентами матеріалу і виділення фаз, що включають водень (гідриди і т.п.);
- поверхневий вплив (хемосорбція) в системі порода-водень.

На рис. 3 показані зразки карбонатної породи після стиснення на випробувальній машині «Інстрон» з попередньою обробкою гарячим атомарним воднем, отриманим, наприклад в реакціях гідридів металів, або карборанів з водою, (а), холодним молекулярним воднем із балона (б), і без обробки воднем (в). Рівень навантаження був приблизно однаковим. Як видно із рис. 3, вплив атомарного водню – найбільший. Зазначимо, що водневі термобарохімічні технології інтенсифікації припливу нафти та газу є на сьогодні одні з найпотужніших.

До розміцнення пружно крихких порід призводять також потужні вибухові навантаження [8-13]. Механізми розміцнення гірських порід під дією вибухових навантажень можна розділити на декілька основних видів:

- виникнення мікро- та макротріщин поблизу вільних поверхонь при відбиванні ударних хвиль та хвиль стиснення під дією розтягуючих та зсувних напружень [12];
- виникнення нано- та мікротріщин, ріст розмірів макротріщин в породі під дією зсувних напружень при певних режимах взаємодії хвиль стиснення за дилатансійним механізмом [4, 11]; розтріскування зерен породи на контактах при стисненні та зсуві [4];
- виникнення мікро- та макротріщин поблизу місць взаємодії детонаційних хвиль (ДХ) та взаємодії ДХ з жорсткими інертними вставками [13]
- макроруйнування поблизу місця контактного або кумулятивного вибуху.

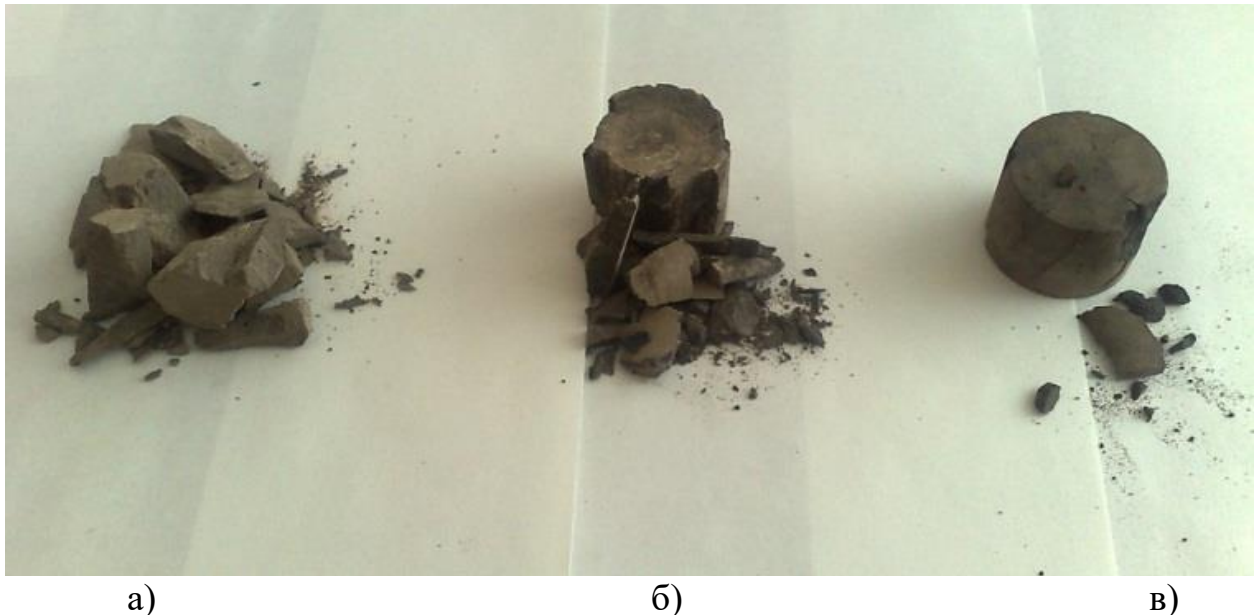


Рис. 3. Картини руйнування карбонатної породи одноосьовим стисненням після обробки гарячим воднем (а), холодним воднем (б), та без обробки (в)

Деякі з цих механізмів реалізуються при масових вибухах шляхом розміцнення порід в сусідніх блоках, при подрібненні негабариту, при вибуховому розміцненні та розуцільненні порід-колекторів нафти і газу.

Із практики робіт з інтенсифікації нафто газовидобутку відомо, що утворення зон розміцнення та руйнування породи-колектора призводить до підвищення проникності та підвищення продуктивності свердловини. При цьому знижуються акустичні характеристики породи (швидкості хвиль поздовжнього та поперечного звуку), що свідчить про формування мікродфектної структури. Наприклад, після кожної вибухової кумулятивної перфорації навколо отвору утворюється зона руйнування та розміцнення у вигляді радіальних мікро- та макротріщин. Кожна наступна перфорація призводить до збільшення її розмірів і, як наслідок, до збільшення розміру зони



проникності біля свердловини. Як правило продуктивність свердловини поступово збільшується після кожної наступної перфорації. Підривання попарно зближених кумулятивних зарядів призводить до утворення додаткової мікротріщинуватості між сусідніми каналами та навколо них за рахунок дії ударних хвиль, хвиль стиснення та за фронтового інерційного руху гірської породи. Це помітно покращувало роботу нафтових і газових свердловин [10]. Ультраткороткоуповільнене підривання свердловинних зарядів максимально покращувало роботу свердловин за рахунок дилатансії порід-колекторів [4, 11].

В роботі [12] описано численні результати утворення систем мікро- та макротріщин при відбиванні хвиль стиснення та ударних хвиль від вільних поверхонь в зразках люсіту при підриванні накладних та камуфлетних зарядів. В експериментах по руйнуванню блоків поліметилметакрилату утворювались дископодібні мікротріщини при підриванні свердловинних зарядів гексогену масою  $\sim 0,15$  г [11]. Мікротріщини діаметром  $\sim 1,5-3$  мм утворювались поблизу вільних поверхонь кубічного зразка в кількості  $\sim 5-15$  шт. в хвилях розтягу при взаємодії з падаючою хвилею стиснення. Основний результат руйнування матеріалу представлено трьома-чотирма радіальними макротріщинами навколо свердловини. Ефект розміцнення геоматеріалів поблизу вільних поверхонь використано в технології реконструкції масивних споруд (товщиною  $\approx 1$  м) із залізобетону з густою сіткою арматури [11]. В технології використано накладні кумулятивні заряди і декілька патронів аммоніту-6ЖВ на початковій стадії. Патрони (3-4 шт.) розміщувались в отворах, утворених кумулятивними струменями. Після створення врубової порожнини дробіння та відбивання залізобетону здійснювалося виключно накладними кумулятивними зарядами, розташованими навколо порожнини. Буровий інструмент не використовувався зовсім. За допомогою цієї технології в масивному залізобетоні створювали технологічні отвори розміром  $\sim 2 \times 3$  м [11]. Всього було реконструйовано 8 залізобетонних сховищ паливно-мастильних матеріалів. Продуктивність робіт – один об'єкт за робочу зміну (8 год.).

Для розуміння впливу кумулятивного вибуху на стан матеріалу навколо пробитого отвору були проведені експерименти на металічних мішенях та гірських породах різної міцності за методикою, описаною в роботі [14]. Результати цих експериментів показані на рис. 4, 5. На рис. 4 показана залежність відносної глибини довгого вузького каналу в різних матеріалах при проникненні композитної струменя W - Cu - Pb (з співвідношенням масових часток компонентів 0,7 / 0,2 / 0,1;  $d_c$  – калібр заряду). Ця залежність підтверджує висновки, сформульовані в роботі [14], оскільки твердість по Брінеллю маловуглецевих сталей становить 1630-2700 МПа, в кілька разів перевищуючи цю характеристику для АМЦ-Н. Дані про твердість по Брінеллю для бетонів і гірських порід в літературі відсутні. Є дані по їх твердості по Л.А. Шрейнеру, які якісно показують збільшення міцності і твердості в ряду: пінобетон-бетон-граніт, що власне і підтверджує графік на рис. 4. При цьому граніт та бетон при пробитті поводяться як крихкі матеріали, а пінобетон швидше як пластичний. Це підтверджує стан перепони в неметалічних

матеріалах навколо отвору. Якщо в граніті (пористість 1,7-1,9%) навколо неї утворилося 1-2 магістральних тріщини, зароджуючись в хвилях розрідження; в бетоні (пористість 20,0-22%) – кілька дрібних радіальних тріщин і одна-дві магістральних, то в пінобетоні (пористість 80 - 82%) тріщини були відсутні через пластичне деформування середовища і витрати енергії на сплескування пор. Середній розмір пор в бетоні, визначений під мікроскопом МБС-9, становив 10-400 мкм, в пінобетоні – 0,1-1,1 мм. Якщо провести уявну лінію через точки для пористих матеріалів (граніт, бетон та пінобетон), то отримаємо залежність глибини пробиття від пористості, яка близька до лінійної. Діаметри пробитих отворів мінімальні в стали і граніті (0,25-0,32) дс і максимальні в АМЦ-н і пінобетоні (0,35-0,41) дс. Розміри отриманих отворів відповідають сучасним уявленням про реальні кумулятивні заряди. Вони корелюють з розмірами утворюваних тріщин навколо них. Для отримання більш широких отворів за допомогою ударних ядер в кумулятивному заряді використовують кумулятивні облицювання у вигляді сферичних сегментів, або спеціальні пористі матеріали для кумулятивних облицювань (Cu, Al, Fe) (рис.5) [14]. На рис.5 окрім мішені показані кумулятивні облицювання (КО) однакової форми та розмірів із порошкової міді (зліва) та алюмінію (справа). Використання цих та інших металів та їх сумішей дозволяє отримувати матеріали та заряди з необхідними інженерними властивостями: короткі широкі отвори (КО із Al), або довгі вузькі отвори (КО із міді), або із їх сумішей (проміжні розміри) При цьому змінюються також розміри зон тріщинуватості навколо отворів, який визначається калібром заряду, швидкістю детонації вибухової речовини, а також формою і матеріалом облицювання кумулятивної виїмки.

Для аналізу величини зниження міцності породи в результаті появи локальної системи мікро- та макротріщин необхідно використовувати розв'язки просторових задач механіки руйнування, яких на сьогодні явно недостатньо для такого аналізу. Відомі розв'язки плоскої задачі механіки руйнування для тіла з тріщиною розміром  $2l$  та тіла з періодичною системою тріщин у разі їх розтягу та зсуву нормальними  $\sigma$  та дотичними  $\tau$  напругами мають такий вигляд [3]:

$$K_1 = \sigma \sqrt{\pi l} \quad (5)$$

$$K_{11} = \tau \sqrt{\pi l} \quad (6)$$

– для однієї тріщини.

Міцність можна визначити з умови  $K_1 = K_{1c}$ ,  $K_{11} = K_{11c}$ , де  $K_{1c}$  – в'язкість руйнування (тріщиностійкість) гірської породи з тріщинами при розтягу, а  $K_{11c}$  – при зсуві.  $K_1$  – коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) в вершині тріщини при розтягу, а  $K_{11}$  – КІН в вершині тріщини при поперечному зсуві.

Для періодичної системи тріщин довжиною  $2l$  [3]

$$K_1 = \sigma \cdot \sqrt{2 \epsilon t g \frac{\pi l}{2 \epsilon}}, \quad (7)$$

$$K_{11} = \tau \cdot \sqrt{2 \epsilon t g \frac{\pi l}{2 \epsilon}} \quad (8)$$

де  $2e$  – відстань між серединами тріщин.

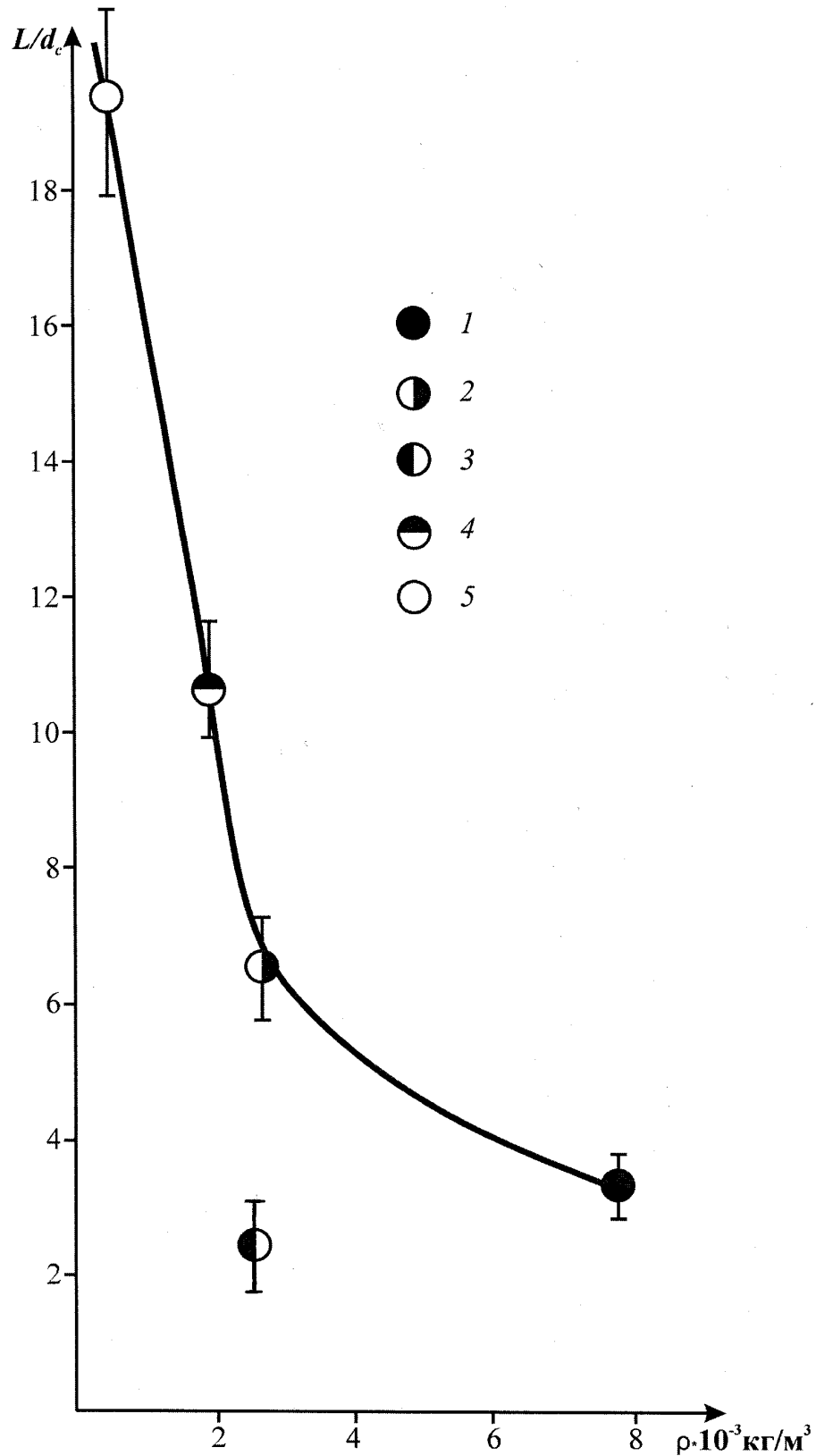


Рис. 4. Залежність відносної глибини отвору від щільності матеріалу перепони:  
1 – сталь, 2 – алюмінієвий сплав, 3 – граніт, 4 – бетон, 5 – пінобетон. На мішенях 2-5 – зверху пластина з Ст.3 товщиною 10 мм



Рис. 5. Результати кумулятивного пробиття мішені із АМЦ-н мідними (малі діаметри) та алюмінієвими струменями (найбільші діаметри)

Розрахунки міцності для систем мікротріщин, показаних на рис. 2, в наближенні плоскої деформації дають наступні значення міцності породи з поодинокую тріщиною розміром  $2l = 10^{-4} \text{ м}$ ;  $\sigma = 80K_{1c}$ . Для періодичної системи мікротріщин, розташованих ланцюгом в одній площині з

$$2l = 10^{-4} \text{ м}; 2v = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}; \sigma = 62K_{1c}.$$

При  $2l = 2v$  розрахунок за формулами (7-8) показує, що міцність на розрив  $\sigma$  і на зсув  $\tau$  дорівнює нулю. Тобто, якби в зразку, показаному на рис. 2, була наскрізна періодична система тріщин з указаним співвідношенням розмірів, то незалежно від їх розмірів міцність його на розрив і на зсув була б близькою до нуля. В реальних умовах на вибої бурової свердловини навколо геотехнологічної свердловини система тріщин може бути поверхневою (рис. 2), або локалізованою в просторі, в тому числі при потужних вибухових обробках [8, 10, 11]. Тому реальна енергоємність руйнування ніколи не зменшується до нуля, але помітно зменшується в порівнянні з енергоємністю руйнування монолітних порід, при цьому вона зменшується зі збільшенням розміру зони тріщинуватості, кількості тріщин та відстані між ними. Згідно з принципом Сен-Венана область дії напружень при механічному бурінні не виходить за межі розміру прикладеного навантаження, тобто діаметра бурового інструмента. Тому і глибина зони розміщення не повинна перевищувати цей розмір. Для відповіді на питання, який із методів розміщення має в цьому сенсі перевагу, потрібні спеціальні дослідження глибини і структури зони розміщення для кожного методу.

До речі, знижена енергоємність руйнування імпульсних та комбінованих методів буріння (ударно-обертний, гідроімпульсний (табл. 2)) пояснюється періодичним розміщенням породи на певну глибину від вибою. Із

фізичних міркувань, а також із аналізу рішень найбільш відомих плоских і просторових задач механіки руйнування [3] руйнуюче навантаження зменшується з ростом кількості тріщин та їх розмірів в області розміщення, залежить від конфігурації, їхньої глибини. Проте ці залежності не є монотонними, як показує наведений вище приклад для періодичної системи тріщин, розташованих в одній площині. Немонотонність такої залежності буде характеризувати систему паралельних тріщин та інші періодичні системи тріщин [3].

На завершення відмітимо, що на Заході досліджено та реалізовано в дослідках схему розміщення понад міцних порід при обертовому термічному бурінні, яке реалізується дією перегрітої пари, плазми або лазерного випромінювання [15]. Розміщення і навіть руйнування породи відбувається шляхом утворення мікро- та макротріщин за рахунок теплових напружень. Теплові головні напруження навколо отвору при пропалюванні лазерним променем або плазмовим потоком можна оцінити за формулами  $\sigma_1 = \sigma_2 = -\alpha ET / (1-\nu)$ ;  $\sigma_3 = 0$  ( $\alpha$  – коефіцієнт лінійного температурного розширення,  $T$  – температура) [3]. Тобто порода знаходиться в умовах плоского напруженого стану з всестороннім стисненням. Посилити процес руйнування можна появою напружень розтягу, або зсуву. Якщо промінь лазера буде скануючим, як запропоновано в деяких патентах, і буде діяти біля стінки вже пропаленого отвору, то знак одного з напружень може помінятися. І тоді згідно з умовою Треска на стінці цього отвору виникнуть тріщини зсуву або розриву. Ці тріщини значно зменшують міцність пружно-крихких порід перед основною стадією руйнування в процесі буріння.

## Висновки

1. Технології розміщення гірських порід в процесах буріння, дробіння, вторинного розкриття пластів та інтенсифікації припливу пластових флюїдів є самостійним технологічним напрямком збереження енергії за рахунок її економії та економії ресурсів, а також потужним методом збереження довкілля.

2. Показано, що будь які фізичні та хімічні впливи на гірську породу, які послаблюють молекулярні і атомарні зв'язки та формують в ній мікродфектну структуру з періодичною системою мікро- чи макротріщин, корисні для зниження енергоємності основного процесу руйнування. При цьому перевагу мають ті методи розміщення, які дозволяють створювати поодинокі макро тріщини та просторові ансамблі мікротріщин та мікродфектів. Для технологій буріння глибина області утворення макротріщин або ансамбля мікротріщин повинна бути не більшою, ніж діаметр бурового інструмента.

3. Для розміщення порід кумулятивним вибухом при бурінні більш прийнятніші заряди з КО у формі сферичних сегментів, або конічних з тупими кутами в вершині. При перфорації продуктивних пластів перевагу мають кумулятивні заряди з композитними облицюваннями на основі сумішей “Cu – Al” у вигляді конусів з гострими кутами.

**Список використаних джерел**

1. Крючков, А.И. Энергоемкость погрузки горной массы в транспортные средства одноковшовым экскаватором [Текст] / А.И. Крючков, Л.И. Евтеева // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». – 2010. – Вип. 19. – С. 80 – 87.
2. Шашенко, О.М. Деформованість та міцність масивів гірських порід [Текст] / О.М. Шашенко, О.О. Сдвижкова, С.М. Тапеев – Д.: Національний гірничий університет, 2008 – 224 с.
3. Черепанов, Г. П. Механика хрупкого разрушения [Текст] / Черепанов Г.П. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
4. Михалюк, А.В. Горные породы при неравномерных динамических нагрузках [Текст] / А.В. Михалюк. – Киев. : Наук. думка, 1980. – 154 с.
5. Войтенко, Ю.И. О возможности изменений фильтрационных и прочностных свойств плотных пород-коллекторов на мезо- и наноуровне при взрывном и термобарохимическом воздействии [Текст] / Ю.И. Войтенко, О.В. Кравченко, Д.А. Велигоцкий // Международная научно-практическая конференция «Перспективы использования альтернативных и возобновляемых источников энергии в Украине – г. Судак (АР Крым, Украина). – 2013 – С. 13 – 18.
6. Стрельцова, І.М. Зниження енергоемності руйнування гірських порід магніто-гідрокавітаційними навантаженнями [Текст]: автореф. дис. кандидата техн. наук: 05.15.09/ НТУУ КПІ. – К., 2016. – 22 с.
7. Галиев, Ш.У. Об одном эффекте в экспериментах академика М.А. Лаврентьева [Текст] / Ш.У. Галиев., Н.В. Нечитайло // 2-я Всесоюзная конференция « Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике». - Киев: Ин-т математики АН УССР. – 1985. – С. 63-65.
8. Terentiev, O. Rocks fracturing with explosive – mechanical means [Текст] / O. Terentiev, P. Gontar // Вісник НТУУ КПІ. Серія «Гірництво». – 2015. – Вип. 28. – С 71 – 76.
9. Мосинец, В.Н. Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород [Текст] / В.Н. Мосинец, А.В. Абрамов. – М.: Недра, 1982. – 248 с.
10. Меркулов, А.А. Научные основы создания эффективной гидродинамической связи скважины с пластом с использованием энергии взрыва [Текст]: дисс. доктора техн. наук: 25.00.17: защищена 22.02.16: утверждена 15.12.16/ Меркулов Александр Алексеевич. – М.: 2016. – 310 с. – Библиогр. с. 287 – 297.
11. Войтенко, Ю.І. Фізико-технічні основи свердловинних геотехнологій з керуванням тріщино утворенням [Текст]: дис. доктора техн. наук: 05.15.11: захищена 24.02.01: затв. 14.11.01 / Войтенко Юрій Іванович. – К.: 2001. – 377 с.
12. Кольский, Г. Волны напряжений и разрушение [Текст] / Г. Кольский, Д. Райдер // Разрушение в 7 – и т. – Т1. Микроскопические и макроскопические основы механики разрушения / Ред. Г. Либовиц. – М.: Мир, 1973. – 616 с.
13. Копка, І.О. Розробка конструктивних елементів подовженого заряду для управління механічним ефектом вибуху [Текст]: дис. магістра: 8050301 /

Копка Ігор Олександрович. – К.: 2016. – 105 с.

14. Войтенко, Ю.И., Бугаец В.П. Влияние алюминия на ударные свойства композитных кумулятивных струй [Текст] / Ю.И. Войтенко, В.П. Бугаец // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». – 2016. – Вип. 30. – С. 36 – 48.

15. Гошовський, С.В. Геотермальні ресурси Землі - основа невичерпного енергетичного потенціалу України [Текст] / С.В. Гошовський, О.В.Зурян, П.Т. Сиротенко // Перспективи використання альтернативних і відновлювальних джерел енергії в Україні. (REU 2015) – Одеса. – 2015. – С. 58 - 73.

*Стаття надійшла до редакції 05.09.2016 р.*

УДК 622.235.535.2

**А.О. Кузьменко, к. т. н., О.М. Чала, к. т. н., Т.В. Хлевнюк, к. т. н., Д.В. Хлевнюк, аспірант (ІГМ НАНУ)**

## **ПРО СЕЙСМІЧНУ ДІЮ ВИБУХУ РОЗОСЕРЕДЖЕНОГО ЗАРЯДУ**

**A.A. Kuzmenko, O.M. Chala, T.V. Khlevniuk, D.V. Khlevniuk (Institute of Hydromechanics NANU)**

### **SEISMIC ACTION OF EXPLOSION IS DISPERSED CHARGE**

*Проаналізовано фізичну суть процесів, що відбуваються при одночасному підриві розосереджених зарядів. Досліджений ефект направленості сейсмічної дії вибуху розосереджених зарядів відносно лінії розташування зарядів. Отримана узагальнена залежність швидкості зміщення ґрунту від параметрів вибуху і епіцентральної відстані. Показано на конкретних прикладах, що розосереджені заряди, що підриваються одночасно, є основним ланцюгом у системі кар'єрних масових вибухів при видобуванні корисних копалин.*

**Ключові слова:** сейсмічні коливання; кількість зарядів; взаємодія зарядів; відстані між зарядами; коефіцієнти сейсмічності і затухання інтенсивності хвиль; одиничний заряд; зосереджений і розосереджений заряди; зсув фаз; ефективний заряд.

*Проанализировано физическую суть процессов, происходящих при одновременном подрыве рассредоточенных зарядов. Исследован эффект направленности сейсмического воздействия взрыва рассредоточенных зарядов относительно линии расположения зарядов. Получена обобщенная зависимость скорости смещения грунта от параметров взрыва и эпицентрального расстояния. Показано на конкретных примерах, что рассредоточенные заряды, подрываемые одновременно, являются основным звеном в системе карьерных массовых взрывов при добыче полезных ископаемых.*

**Ключевые слова:** сейсмические колебания; количество зарядов; взаимодействие зарядов; расстояния между зарядами; коэффициенты сейсмичности и затухания интенсивности волн; единичный заряд; сосредоточенный и рассредоточен заряды; сдвиг фаз; эффективный заряд.

*Analysis of physical essence of the processes taking place at simultaneous undermining the distributed of charges. Investigated the effect directivity the seismic exposure to of the explosion*