

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**Гонтарь Павло Анатолійович**

УДК 622.236.9

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ  
МЕХАНІЧНОГО РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД  
ВИКОРИСТАННЯМ КУМУЛЯТИВНОГО ВИБУХОВОГО ЯДРА**

05.15.03 – відкрита розробка родовищ корисних копалин

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі геобудівництва та гірничих технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**ТЕРЕНТЬЄВ Олег Маркович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»,  
професор кафедри електромеханічного обладнання  
енергоємних виробництв.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,  
**ВОЙТЕНКО Юрій Іванович**,  
Український державний геологорозвідувальний інститут  
Міністерства екології та природних ресурсів України,  
головний науковий співробітник

кандидат технічних наук, доцент  
**КАЛЬЧУК Сергій Володимирович**,  
Житомирський державний технологічний університет,  
доцент кафедри розробки родовищ корисних копалин  
ім. проф. М.Т. Бакки.

Захист відбудеться «28» лютого 2017 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.22 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, вул. Борщагівська, 115/3, ауд. 511.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «27» січня 2017 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Вапнічна В.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сумарні запаси природного декоративного каменю в Україні становлять понад 500 млн. м<sup>3</sup>. Розвідані запаси на 74 % (118 млн. м<sup>3</sup>) складаються з граніту, габро, лабрадориту – скельних гірських порід. Буріння шпурів в цих гірських породах характеризується енергоємністю понад 120 кВт·год/м<sup>3</sup>. Це обумовлено тим, що згідно з діаграмою деформування близько 90 % енергії витрачається на «підготовку» гірських порід до руйнування. Оскільки процес руйнування гірських порід - найбільш енергоємний та його об'єми ростуть, особлива увага приділяється раціональному використанню енергії.

Сьогодні проводяться пошуки комбінацій механічних та немеханічних способів для зниження енергоємності руйнування гірських порід. Таке поєднання забезпечить руйнування гірських порід в широкому діапазоні їх фізико-механічних властивостей. Аналіз фундаментальних праць з теорії вибуху Баума Ф. А., Бойка В. В., Вовка О. О., Кравця В. Г., Лаврентьєва М. О., Орленка Л. П., Станюковича К. П., Фортова В. Е. обумовив розробку саме вибухо-механічного способу руйнування гірських порід. Вплив енергії вибуху на вибій послаблює гірські породи, формуванням внесеної технологічної тріщинуватості, додатково до існуючої природної. В результаті знижуються міцнісні властивості гірських порід і витрати енергії на руйнування. Незважаючи на енергетичні показники вибухової хвилі, важливе забезпечення її керованості. Зниження енергоємності вибухо-механічного руйнування гірських порід за рахунок спрямування енергії вибуху перпендикулярно до вибою є актуальною науково-технічною задачею.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертація виконувалась на кафедрі геобудівництва та гірничих технологій КПІ ім. Ігоря Сікорського згідно з завданням Постанови Кабінету Міністрів України від 1 березня 2010 р. № 243 «Про затвердження Державної цільової економічної програми енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлювальних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010 - 2016 роки». Науково-технічну задачу, на вирішення якої спрямована дисертація, обрано з аналізу Енергетичної стратегії України на період до 2035 року, розроблену Національним інститутом стратегічних досліджень України. Роботу виконано відповідно до наукових тем: «Руйнування гірських порід комбінованими вибухо-механічними навантаженнями» (№ ДР 0115U005287); «Наукові основи ресурсозберігаючих технологій гірництва та геотехнічного будівництва» (№ ДР 0115U005398), в яких автор дисертації був виконавцем.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розробка енергоефективної технології руйнування гірських порід комбінованими вибухо-механічними навантаженнями.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні задачі:

- обґрунтування енергоефективного комбінованого способу руйнування гірських порід з використанням кумулятивного вибухового ядра;
- математичне моделювання енергоємності руйнування гірських порід в умовах вибухо-механічних навантажень;

- експериментальні дослідження впливу частоти навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром та температури вибуху на питому енергоємність вибухо-механічного руйнування гірських порід;

- розробка методики розрахунку енергоємності вибухо-механічного руйнування гірських порід з керованим кумулятивним вибуховим ядром.

*Об'єкт дослідження* – процес руйнування гірських порід комбінованими вибухо-механічними навантаженнями.

*Предмет дослідження* – закономірності формування комплексної тріщинуватості гірських порід вибухо-механічними навантаженнями з використанням кумулятивного вибухового ядра.

**Методи дослідження.** При виконанні роботи використані наступні методи: *аналітичний* – для встановлення закономірностей руйнування гірських порід вибухо-механічними навантаженнями при створенні внесеної технологічної тріщинуватості, додатково до природної; *регресійного аналізу* – для статистичного дослідження залежності енергоємності руйнування гірських порід від частоти навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром та температури вибуху; *математичного моделювання* – для створення математичної моделі питомої енергоємності руйнування гірських порід вибухо-механічним способом; *експериментальний* – для отримання залежностей енергоємності руйнування від частоти навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром та температури вибуху; *техніко-економічного аналізу* отриманих результатів.

**Наукова новизна одержаних результатів** представлена наступними науковими положеннями, в яких вперше:

– розроблено математичну модель енергоємності руйнування гірських порід, що відрізняється від відомих врахуванням енергії активації руйнування гірських порід, кінетичної енергії кумулятивного вибухового ядра, теплової енергії вибуху, енергії механічного руйнування гірських порід;

– встановлено залежність модуля пружності I роду від частоти навантажень кумулятивним вибуховим ядром у вигляді полінома шостого ступеню, за якою раціональна частота навантажень гірських порід кумулятивним вибуховим ядром знаходиться в діапазоні 12...24 виб/хв;

– встановлено залежність питомої енергоємності вибухо-механічного руйнування гірських порід від температури вибуху у вигляді поліному другого ступеню, за якою зі збільшенням температури вибуху в діапазоні 2700...3400 К енергоємність знижується на 4 % для габро, на 6 % для граніту, на 7 % для пісковика;

– встановлено залежність питомої енергоємності вибухо-механічного руйнування гірських порід від частоти навантажень кумулятивним вибуховим ядром у вигляді поліному другого ступеню, за якою зі збільшенням частоти навантажень кумулятивним вибуховим ядром в діапазоні 12...24 виб/хв енергоємність знижується на 9 % для габро, на 13 % для граніту, на 16 % для пісковика.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в наступному:

– розроблено методику розрахунку питомої енергоємності руйнування гірських порід, використана на ПП «Давидівський гранкар'єр», що враховує

параметри вибухо-механічного навантаження вибою та сукупність дії його природної та внесеної тріщинуватостей;

- створено конструкцію вертлюга модифікованого та ріжучого інструменту, що забезпечує надходження зарядів вибухової речовини до вибою та їх детонацію з частотою 12...24 виб/хв;

- розроблено конструкцію зарядів вибухової речовини, що забезпечує детонацію всередині ріжучого інструменту комбінованої дії з формуванням кумулятивного вибухового ядра, направлено на вибій.

- використано у виробничих умовах ПП «Давидівський гранкар'єр» інноваційний спосіб комбінованого руйнування гірських порід та конструкцію ріжучого інструмента вибухо-механічної дії (патент України 107732 UA).

Результати дисертаційних досліджень апробовано у технологічному процесі ПП «Давидівський гранкар'єр» та у навчальному процесі КПІ ім. Ігоря Сікорського при вивченні курсу «Віртуальні прилади інженерних досліджень». Енергоємність руйнування гірських порід знижено з 201 кВт·год/м<sup>3</sup> до 188 кВт·год/м<sup>3</sup> внаслідок формування комплексної тріщинуватості на вибої вибухо-механічними навантаженнями.

**Особистий внесок здобувача** в роботи, опубліковані у співавторстві. Проведено системний аналіз способів комбінованого руйнування гірських порід, виділено їх недоліки та переваги [1]; визначено енергетичні параметри кумулятивного вибухового ядра [5]; розроблено конструкцію зарядів вибухової речовини [12]; створено конструкцію експериментального пристрою та ріжучого інструменту вибухо - механічної дії [2]; створено формулу патенту на винахід «Спосіб комбінованого руйнування гірських порід» [6]; проаналізовано критерії руйнування гірських порід щодо енергоефективності [8]; здійснено математичне моделювання вибухо-механічного руйнування гірських порід [9]; встановлено зниження швидкості ультразвукових хвиль в зразках гірських порід від частоти навантажень кумулятивним вибуховим ядром [3].

**Апробація результатів дисертації.** Результати досліджень представлені на конференціях: «Иновационные технологии разработки месторождений полезных ископаемых» (Донецьк, 2013), «Перспективы развития горного дела и подземного строительства» (Київ, 2013), Scientific technologies of the future (Лінчопінг, Швеція, 2014), «Аспірантські читання пам'яті А. В. Праховника» (Київ, 2014), «Проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, Росія, 2014), «Computer technologies in science» (Валенсія, Венесуела, 2014). На міжнародному конкурсі молодих вчених «Проблемы недропользования» за матеріалами дисертації автор здобув третє місце.

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 12 наукових праць, у тому числі 5 статей в провідних фахових виданнях України, 4 з яких включено до міжнародних наукометричних баз, 1 патент України на винахід, 6 тез доповідей на міжнародних та національних конференціях.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, заключення, переліку посилань та додатків. Загальний обсяг дисертації 131 сторінка. Робота містить 63 рисунка, 13 таблиць, 6 додатків. Список використаних літературних джерел включає 165 найменувань (на 17 сторінках).

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** дана загальна характеристика роботи, обґрунтована актуальність обраної теми дисертації. Сформульовані мета та задачі дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження, виділено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів. Відзначено зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами та особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** представлено результати системного аналізу комбінованого руйнування гірських порід. Запропонована нова класифікація комбінованих навантажень на вибій із застосуванням теорії графів. Обрано граф Тудора Замфіреску для класифікації способів руйнування гірських порід. Граф дозволяє формувати максимальну кількість зв'язків між вершинами. Кожна вершина відповідає способу руйнування гірських порід. Таким чином дуги графа сполучають вершини, формуючи комбінації способів. Це дозволило виділити 132 можливих комбінованих способа руйнування гірських порід. Запропоновано раціональне поєднання механічних та вибухових руйнівних навантажень. Визначено, що енергія вибуху поєднує наступні руйнівні чинники: швидкість навантаження, тиск, температуру та електромагнітні коливання. Доповнення цих чинників кумулятивним ефектом (ефект Манро) дозволяє отримати контрольовану енергію вибуху, що діє на вибій, доповнюючи природну тріщинуватість внесеною технологічною. Таким чином міцнісні властивості гірських порід знижуються, що полегшує руйнування механічними навантаженнями. Комбіноване навантаження вибою забезпечує зниження питомої енергоємності його руйнування завдяки послабленню гірських порід, доповненням природної тріщинуватості внесеною технологічною.

В результаті проведеного системного аналізу виділено 23 сучасних способа руйнування, що дозволяють бурити свердловини в гірських породах різної міцності. Проте недостатньо обґрунтована можливість комбінації навантажень вибою для зниження питомої енергоємності руйнування гірських порід в порівнянні з традиційними способами. Виходячи з цього, сформульовані вищезазначені мета та завдання досліджень.

**Другий розділ** присвячено комплексній методиці та плануванню експериментальних досліджень вибухо-механічного руйнування гірських порід. У якості цільових функцій обрано залежності питомої енергоємності руйнування гірських порід від частоти навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром та температури вибуху. Параметром оптимізації є питома енергоємність руйнування гірських порід. Задачею оптимізації – зниження енергоємності руйнування гірських порід. У якості чинників, що впливають на енергоємність вибухо-механічного руйнування гірських порід обрано їх межу міцності на стиснення, температуру вибуху та частоту навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром. Оскільки обрані чинники варіюють на трьох рівнях застосовано ортогональний центральний композиційний план, який описує поверхні 2-го порядку. Ядром плану експерименту обрано повний чинниковий експеримент типу  $2^k$ . Складено матрицю

планування, що передбачає проведення 60 дослідів з урахуванням повторних у кількості 4 за розподілом Стюдента.

Розроблено конструктивне виконання механізму для вибухо-механічного руйнування гірських порід (рис. 1), а саме: вертлюга модифікованого та ріжучого інструменту комбінованої дії. Обґрунтовано вибір гірських порід, матеріалів та вимірювального обладнання для проведення досліджень.

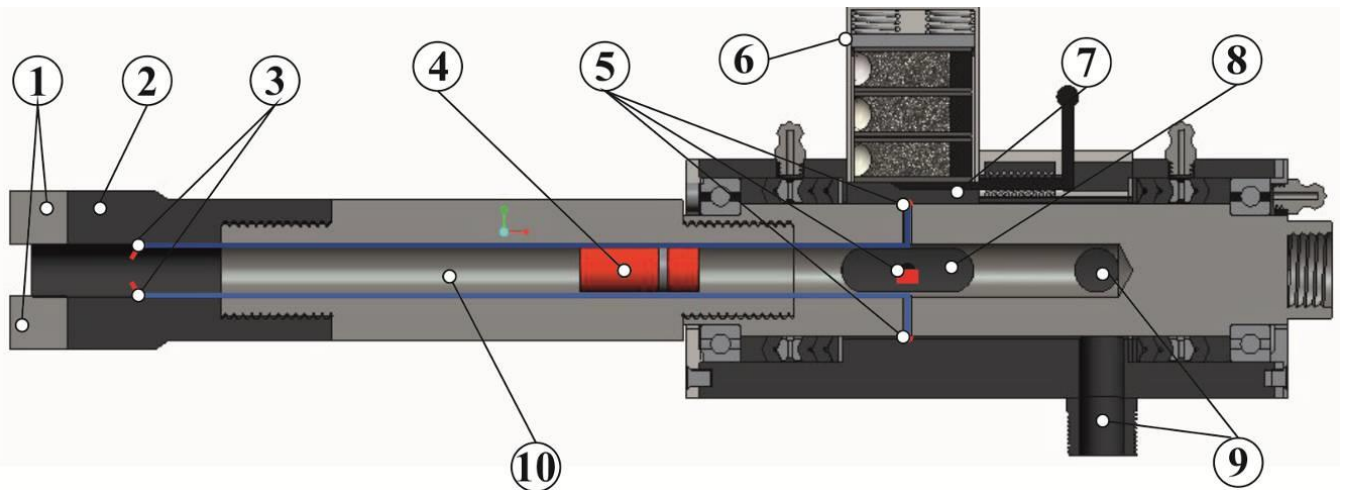


Рис. 1. Конструкція механізму для вибухо-механічного руйнування гірських порід: 1 – різці; 2 – ріжучий інструмент комбінованої дії; 3 – пластини контактні; 4 – заряд вибухової речовини; 5 – напайки контактні; 6 – касета з зарядами вибухової речовини; 7 – затвор; 8 – отвір для подачі зарядів вибухової речовини до продувного каналу; 9 – отвори для нагнітання стисненого повітря; 10 – продувний канал

В результаті взведення затвору 7 заряд вибухової речовини 4 надходить з касети 6 через отвір 8 до продувного каналу 10. Під дією тиску стисненого повітря, що нагнітається через отвори 9 заряд вибухової речовини 4 поступає до ріжучого інструменту 2, куди підведені контактні пластини 3. На контактні пластини 3 імпульсно подається напруга 220 В. Під час замикання контактних пластин 3 електродним кільцем (рис. 2) заряду вибухової речовини 4 відбувається детонація. Формується кумулятивне вибухове ядро, що діє безпосередньо на вибій, формуючи внесену технологічну тріщинуватість, додатково до існуючої природної. Комплексна тріщинуватість знеміцнює вибій, що знижує питому енергоємність його руйнування різцями 1.

У **третьому розділі** проведено аналіз енергетичних, силових та деформаційних критеріїв руйнування з точки зору комбінованого вибухо-механічного навантаження вибою. Виявлені їх переваги та недоліки, а саме: враховують пластичні деформації; описують руйнування при одноосному розтягу; відсутні швидкість прикладання навантаження та вплив комбінації навантажень. Виділено кінетичний критерій руйнування, оскільки передбачає температурні коливання міжатомних зв'язків твердого тіла, що послаблюють його при механічному навантаженні. За результатами аналізу розроблено базовий критерій вибухо-механічного руйнування гірських порід, що поєднує енергію активації

руйнування гірських порід, кінетичну енергію кумулятивного вибухового ядра, теплову енергію вибуху та енергію механічного руйнування гірських порід:

$$e = \frac{k \cdot N \cdot t}{V} \cdot \exp\left(\frac{U_0 - U_k - U_T}{U_{\text{мех}}}\right), \quad (1)$$

де  $k$  – емпіричний коефіцієнт в межах математичного моделювання, в.о.;  $e$  – енергоємність руйнування гірських порід, Вт·год/м<sup>3</sup>;  $N$  – потужність електроприводу експериментального пристрою, Вт;  $t$  – час руйнування гірських порід, год;  $V$  – об’єм гірської породи, що руйнується, м<sup>3</sup>;  $U_0$  – енергія активації руйнування гірських порід, Дж;  $U_k$  – кінетична енергія кумулятивного вибухового ядра, Дж;  $U_T$  – теплова енергія вибуху, Дж;  $U_{\text{мех}}$  – енергія механічного руйнування гірських порід, Дж.

Для урахування параметрів вибухо-механічного навантаження вибою та сукупність дії його природної та внесеної тріщинуватостей базовий критерій доповнено:

- **енергією активації руйнування гірських порід**, що створена на основі питомої масової енергії кристалічних решіток:

$$U_0 = \frac{\sum_{i=1}^n (n_i \cdot U_i) \cdot \rho \cdot V \cdot \eta_0}{\sum_{i=1}^n (n_i \cdot M_i)}, \quad (2)$$

де  $n_i$  – частка мінералів у складі гірських порід, в.о.;  $U_i$  – енергія кристалічних решіток мінералів гірських порід, Дж/моль;  $\rho$  – щільність гірських порід, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta_0$  – коефіцієнт природної тріщинуватості, в.о.;  $M_i$  – молярна маса мінералів гірських порід, кг/моль;

- **кінетичною енергією кумулятивного вибухового ядра**, що модифікована з критерія швидкості проникнення кумулятивного струменю в перешкоду, досліджена в роботах Баума Ф. А.:

$$U_k = \frac{m_0 \cdot a \cdot p_k \cdot u_0^2}{\sigma_{\text{ст}} \cdot [1 + (\alpha_1 \cdot \rho) / (\alpha_2 \cdot \rho_1)]^2}, \quad (3)$$

де  $m_0$  – маса облицювання заряду вибухової речовини, кг;  $a$  – коефіцієнт використання вибуху, еквівалентний частоті навантажень кумулятивним вибуховим ядром, в.о.;  $p_k$  – тиск кумулятивного вибухового ядра, Па;  $u_0$  – швидкість кумулятивного вибухового ядра, км/с;  $\sigma_{\text{ст}}$  – межа міцності на стиснення гірських порід, Па;  $\alpha_1$  – стисливість кумулятивного вибухового ядра, Па<sup>-1</sup>;  $\alpha_2$  – стисливість гірських порід, Па<sup>-1</sup>;  $\rho_1$  – щільність кумулятивного вибухового ядра, кг/м<sup>3</sup>;

- **тепловою енергією вибуху**, яка створена на основі теорії академіка Зельдовича Я.Б.:

$$U_t = a \cdot \sum_{k=1}^n i_k \cdot k \cdot T_{виб} \cdot N_A \cdot \frac{m_{BP}}{M_{BP}}, \quad (4)$$

де  $i_k$  – ступені свободи продуктів детонації, в.о.;  $k$  – стала Больцмана, Дж/К;  $N_A$  – число Авогадро, моль<sup>-1</sup>;  $m_{BP}$  – маса вибухової речовини, кг;  $M_{BP}$  – молярна маса вибухової речовини, кг/моль;

- **енергією механічного руйнування** гірських порід:

$$U_{мех} = \pi \cdot \beta \cdot p \cdot \omega \cdot D \cdot t, \quad (5)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт тертя різців об гірську породу, в.о.;  $p$  – зусилля подачі ріжучого інструмента, Н;  $\omega$  – кутова швидкість ріжучого інструмента, рад/с;  $D$  – діаметр ріжучого інструмента, м.

Доповнивши базовий критерій (1), критеріями (2), (3), (4), (5) отримано математичну модель вибухо-механічного руйнування гірських порід:

$$e = \frac{k \cdot N \cdot t}{V} \cdot \exp \left( \frac{\sum_{i=1}^n (n_i \cdot U_i) \cdot \rho \cdot V \cdot \eta_0}{\sum_{i=1}^n (n_i \cdot M_i)} - \frac{m_{яд} \cdot a \cdot p_{уд} \cdot u_0^2}{\sigma_{см} \cdot [1 + (\alpha_1 \cdot \rho) / (\alpha_2 \cdot \rho_1)]^2} - a \cdot \sum_{k=1}^n i_k \cdot k \cdot T \cdot N_A \cdot \frac{m_{BP}}{M_{BP}} \right) \cdot (\pi \cdot \beta \cdot p \cdot \omega \cdot D \cdot t)^{-1}. \quad (6)$$

Математична модель питомої енергоємності руйнування гірських порід відрізняється від відомих тим, що враховує параметри вибухо-механічного навантаження вибою, сукупність дії його природної та внесеної технологічної тріщинуватостей. З розробленої математичної моделі, отримано аналітичні залежності питомої енергоємності руйнування гірських порід від частоти навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром та температури вибуху. Енергоємність знизилась з 296 до 273 кВт·год/м<sup>3</sup>, або на 9 % для габро; з 250 до 228 кВт·год/м<sup>3</sup>, або на 8 % для граніту; з 211 до 191 кВт·год/м<sup>3</sup>, або на 10 % для пісковика. Отримані залежності мають експоненціальний характер. З аналізу відомих досліджень зміни енергоємності руйнування гірських порід встановлено, що запропонована модель адекватно описує геомеханічні процеси, які протікають під час вибухо – механічного руйнування вибою.

**Четвертий розділ** містить результати експериментальної апробації вибухо-механічного руйнування гірських порід. Для цього виготовлено заряди вибухової

речовини, рис. 2. Обрано вибухові суміші  $Mg + KClO_4$  та  $Al + KClO_4$ . Маса вибухової речовини складає 0,5 гр, щільність заряджання -  $500 \text{ кг/м}^3$ . Матеріалом облицювання 3 є алюміній, оскільки на 20 % збільшує швидкість кумулятивного вибухового ядра ніж при використанні міді. Облицювання 3 виготовлено у формі півсфери, що кумулює вибухове ядро в напрямку вибою. Ударний ефект кумулятивного вибухового ядра є на 15 % стійкішим ніж ефект кумулятивного струменю під час обертання ріжучого інструмента.

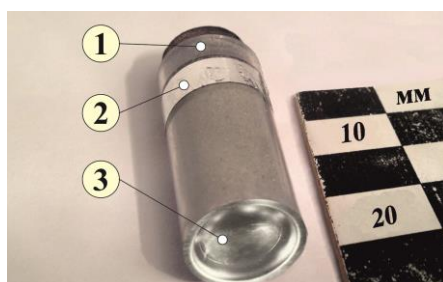


Рис. 2. – Заряд вибухової речовини: 1 – корпус заряду; 2 – електродне кільце; 3 – півсферичне облицювання

Для встановлення необхідної і достатньої частоти навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром проведено оцінку пружних властивостей гірських порід. Отримано поліноміальні залежності зміни швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль в зразках гірських порід та модуля пружності I роду від частоти їх навантажень кумулятивним вибуховим ядром, рис. 3.

Вимірювання швидкості ультразвукових хвиль проведено на базі відомої установки для ультразвукової дефектоскопії УИСУ-01. За значеннями швидкості ультразвукових хвиль визначена анізотропія зразків гірських порід. Під час вимірювань зафіксовано зниження амплітуди ультразвукових сигналів з 14,0 до 8,0 дБ зі збільшенням частоти навантажень кумулятивним вибуховим ядром від 0 до 0,4 Гц. Встановлено, що коефіцієнт затухання сигналу від 0,6 до 1,0 свідчить про вертикальну орієнтацію тріщин з кутом від  $50^\circ$  до  $90^\circ$ .

Залежності швидкості ультразвукових хвиль від частоти навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром мають ознаки поліноміального падіння з трьома характерними ділянками, рис. 3 а. Перша ділянка (від 0 до 4 виб/хв) характеризується експоненціальним падінням кривої зі зниженням швидкості ультразвукових хвиль на  $\approx 100 \text{ м/с}$  для усіх зразків гірських порід. Це викликано руйнуванням поверхні зразків гірських порід з формуванням зколів та мікротріщин. Пластичні властивості окремих мінералів не встигають реалізуватися завдяки близькості до епіцентру вибуху. Пластичні деформації перетворюються на квазіпластичні та крихкі під впливом навантаження кумулятивного вибухового ядра. Внаслідок вибуху продукти детонації нагнітаються в мікротріщини, поглиблюючи їх та відколюють зерна окремих мінералів гірських порід. Тангенс кута падіння для зразків габро та граніту  $\text{tg}(20^\circ) = 0,36$  майже в 2 рази нижчий ніж у пісковика  $\text{tg}(40^\circ) = 0,84$ . Це пояснюється переважанням пластичних властивостей пісковика у порівнянні з габро та гранітом завдяки глинистому середовищу. Під час руйнування поверхневих шарів в зразках гірських порід під внесеною технологічною

тріщинуватістю формується область ущільнення 2, рис. 9 б. Про це свідчить друга ділянка (4...12 виб/хв). Так для зразків габро та граніту продовжується падіння, але більш полого з тангенсом кута  $\text{tg}(85^\circ) = 11,43$ . Ущільнення пояснюється наявністю пластичних мінералів у складі гірських порід: габро - плагіоклаз; граніт – мікроклін. Глинисто-слюдисте середовище та пористість 2,9...3,1 % пісковика сприяли його ущільненню, що відображається зростанням функції з тангенсом кута  $\text{tg}(73^\circ) = 3,27$ . Зі стисненням лабрадора та мікрокліна їх напружений стан зростає, і при досягненні межі міцності на стиснення вони руйнуються. Коефіцієнт тріщинуватості збільшується, про що свідчить третя ділянка (12...24 виб/хв), де відбувається падіння функції. Для габро та граніту кути падіння майже рівні з тангенсами  $\text{tg}(76^\circ) = 4,00$  та  $\text{tg}(84^\circ) = 6,31$ . Третя ділянка для пісковика відзначається падінням функції з тангенсом кута  $\text{tg}(37^\circ) = 0,75$ , що викликано руйнуванням основного мінералу глинистого середовища пісковика - каолініта.

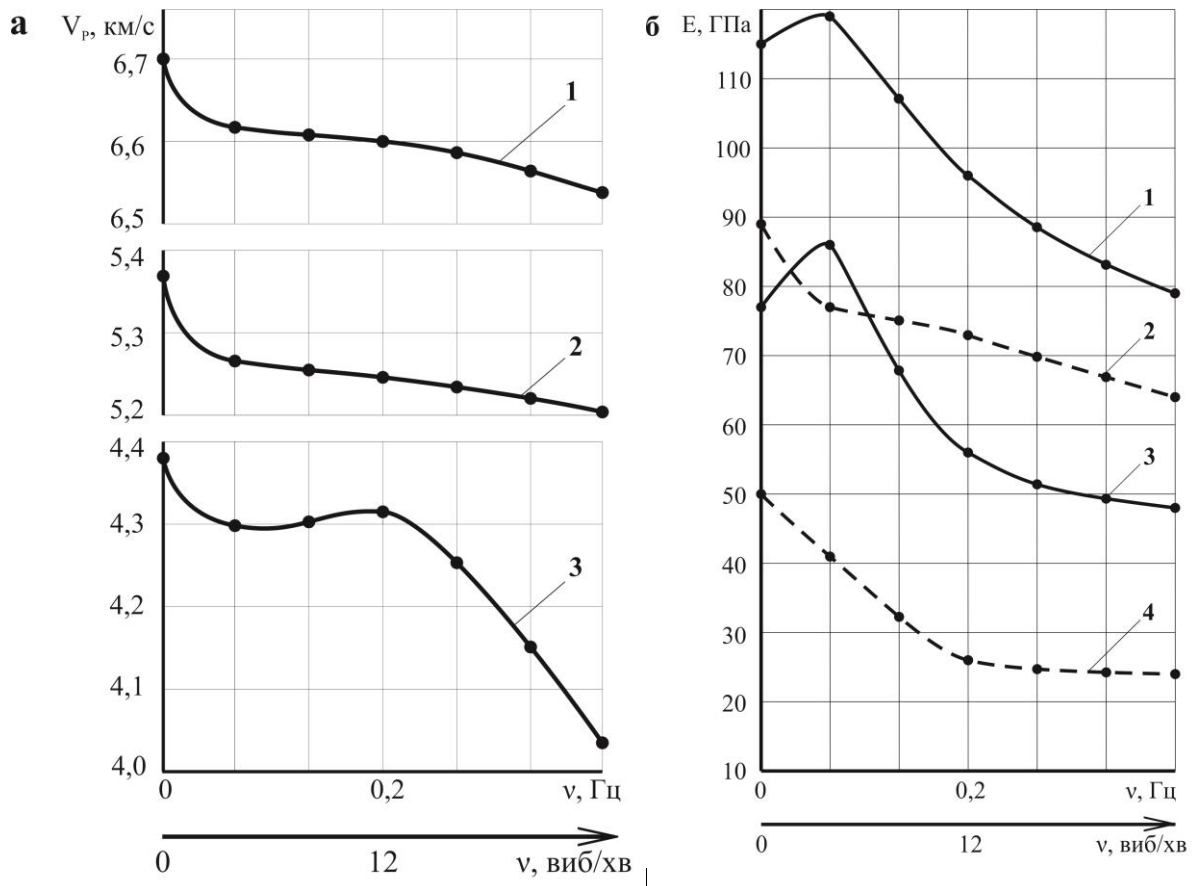


Рис. 3. Залежність швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль в зразках гірських порід (а): 1 – габро; 2 – граніт; 3 – пісковик; та модуля пружності I роду (б): 1 – габро; 2 – мікроклін; 3 – пісковик; 4 – амфібол; від частоти навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром

Вимірювання зміни модуля пружності I роду від частоти навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром проведено за допомогою мікротвердоміра «Мікрон-альфа». Залежність модуля пружності I роду від частоти навантажень кумулятивним вибуховим ядром для габро та пісковика також має 3 характерні ділянки, рис. 3 б. Перша ділянка (0...4 виб/хв) для габро та пісковика відзначаються

зростанням модуля пружності I роду внаслідок ущільнення пластичних мінералів та закриттям мікротріщин. Ущільнення гірських порід призводить до збільшення їх теплопровідності та поглиблює область пластичної деформації. Тому перші ділянки габро та пісковика (0...4 виб/хв) мають тангенс кута зростання рівний відповідно  $\text{tg}(21^\circ) = 0,38$  та  $\text{tg}(41^\circ) = 0,86$ . Близька до епіцентру вибуху поверхня гірських порід не встигає пластично деформуватись. Відколюються мінерали, формуючи впадини, між якими розвиваються мікротріщини. Подальше нагнітання продуктів детонації в існуючі тріщини поглиблює їх, що супроводжується появою нових зколів та мікротріщин. Так зростає коефіцієнт тріщинуватості. Тому модуль пружності I роду для габро та пісковика на другій ділянці (4...12 виб/хв) знижується з тангенсом кута падіння  $\text{tg}(49^\circ) = 1,15$  та  $\text{tg}(57^\circ) = 1,54$  відповідно. На третій ділянці (12...24 виб/хв) інтенсивність падіння модуля пружності I роду для пісковика зменшується до тангенсу кута  $\text{tg}(15^\circ) = 0,26$ . Це пов'язано зі спікаємістю, ущільненого глинистого середовища під дією температури продуктів детонації. На третій ділянці для габро (12...24 виб/хв) тангенс кута падіння також зменшився до  $\text{tg}(29^\circ) = 0,55$  внаслідок пластичного ущільнення плагіоклазу.

Оскільки зерна граніту мають розмір 2...5 мм, а площа вдавлювання індентора мікротвердоміра складає близько 50 мкм, вимірювання проведено для основних мінералів граніту – мікрокліну 2 та амфіболу 4, рис. 3 б. Частка мікрокліну становить 40 % в структурі граніту, тому відображає міцність зразка граніту в цілому. Перші ділянки для мінералів (0...4 виб/хв) відображають крихке руйнування внаслідок близькості до епіцентру вибуху з тангенсом кута падіння  $\text{tg}(52^\circ) = 1,28$  та  $\text{tg}(38^\circ) = 0,78$ . Стрічкоподібні кристали амфіболу відколюються під дією навантажень кумулятивним вибуховим ядром. Тому крихке руйнування першої ділянки для амфіболу продовжується до 12 виб/хв. При збільшенні частоти навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром підповерхневий шар ущільнюється, що призводить до зростання його теплопровідності. Тому на другій ділянці (12...24 виб/хв) проявляються пластичні властивості як мікрокліну, так і амфіболу, а тангенс кута падіння зменшується до  $\text{tg}(14^\circ) = 0,25$  та  $\text{tg}(4^\circ) = 0,07$  відповідно. З аналізу, отриманих залежностей, встановлено необхідну та достатню частоту навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром (12...24 виб/хв) для зниження питомої енергоємності вибухо-механічного руйнування гірських порід.

Проведено побудову тривимірних зображень рельєфу поверхні зразків гірських порід до та після навантажень кумулятивним вибуховим ядром, (рис. 4, 5, 6) за допомогою оптичного нанопрофілометра «Мікрон-альфа».

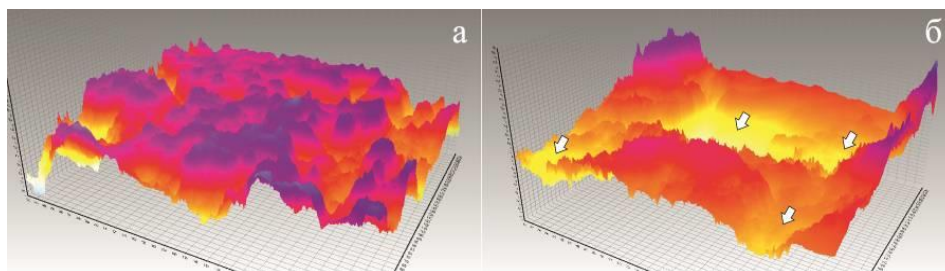


Рис. 4. Мікротопографія поверхні габро: а – до навантаження кумулятивним вибуховим ядром; б – після навантаження кумулятивним вибуховим ядром

Зразки габро до навантажень кумулятивним вибуховим ядром мають нерівність поверхні з наявністю кратерів, рис. 4 а. Кількість кратерів становить 5, що займають 28 % від досліджуваної площі  $3 \cdot 10^4$  мкм<sup>2</sup> глибиною 3...9 мкм, рис. 4 а. В результаті навантаження кумулятивним вибуховим ядром кратери на поверхні габро поглибились до 6...14 мкм та розширились до 45 % від досліджуваної площі  $3 \cdot 10^4$  мкм<sup>2</sup>, рис. 4 б.

Поверхня зразків граніту до навантажень кумулятивним вибуховим ядром відносно гладка з наявністю кратерів у кількості 8, рис. 5 а. Кратери займають 24 % від досліджуваної площі  $3 \cdot 10^4$  мкм<sup>2</sup>, глибина яких становить 1...3 мкм. Характерне утворення ущелини на поверхні граніту, що перетинає досліджувану площу та має глибину 3...14 мкм. Поява ущелини пояснюється розривом зв'язків між стрічкоподібними кристалами рогової обманки, рис. 5 б. Додатково утворився один кратер глибиною 12 мкм, що разом з ущелиною займають площу 40 % від досліджуваної.

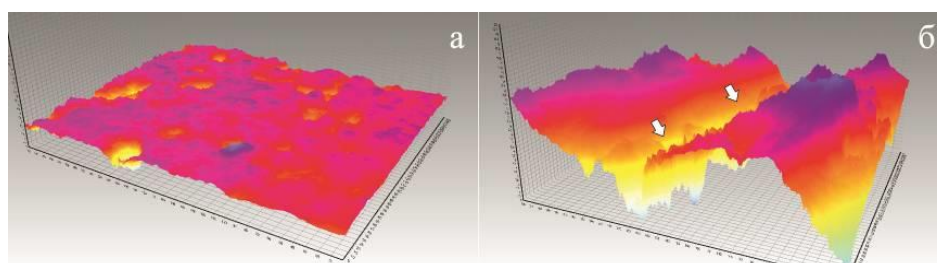


Рис. 5. Мікротопографія поверхні граніту: а – до навантаження кумулятивним вибуховим ядром; б – після навантаження кумулятивним вибуховим ядром

Поверхня зразків пісковика до навантажень кумулятивним вибуховим ядром має поверхню з наявністю кратерів у кількості 7, глибиною 2...8 мкм, рис. 6 а.

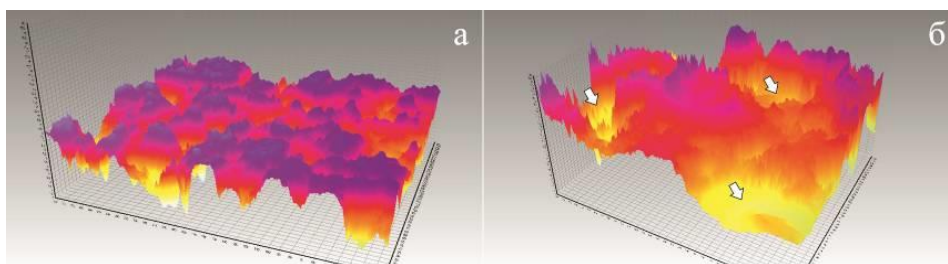


Рис. 6. Мікротопографія поверхні пісковика: а – до навантаження кумулятивним вибуховим ядром; б – після навантаження кумулятивним вибуховим ядром

Кратери займають 53 % від досліджуваної площі  $3 \cdot 10^4$  мкм<sup>2</sup>. Під дією кумулятивного вибухового ядра піщинки кварцу відколюються, розширюючи кратери до 65 % від загальної площі. Глибина збільшилась до 5...18 мкм, що підтверджує рис. 6 б.

Для визначення глибини проникнення внесеної технологічної тріщинуватості внаслідок навантажень кумулятивним вибуховим ядром проведено рентгенографічну зйомку зразків гірських порід, рис. 7, 8, 9 (а, б). Використано

рентгенодефектоскопічний апарат РАП 150/300. Зображення після навантажень кумулятивним вибуховим ядром для зразків габро та граніту відрізняються появою області затемнення 1, рис. 7 б, 8 б.

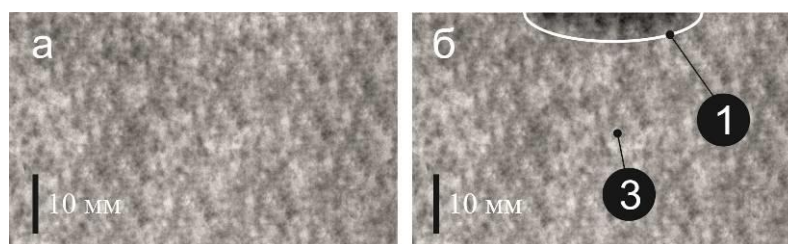


Рис. 7. Рентгенографічне зображення зразка габро: а – до навантажень кумулятивним вибуховим ядром; б – після навантажень кумулятивним вибуховим ядром – область внесеної технологічної тріщинуватості 1, область природної тріщинуватості 3. Область ущільнення 2 відсутня

Встановлено, що область 1 відображає внесену технологічну тріщинуватість, наповнену повітрям. Глибина області внесеної технологічної тріщинуватості 1 для габро склала 5 мм, ширина - 23 мм, рис. 7 б.

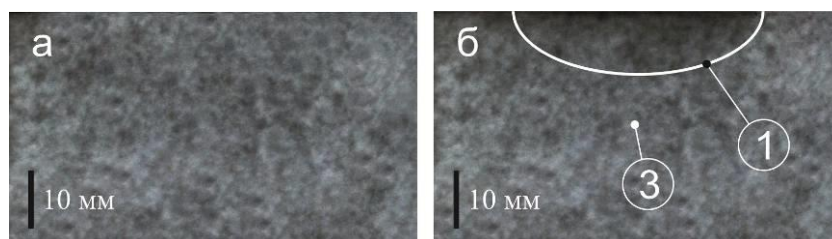


Рис. 8. Рентгенографічне зображення зразка граніту: а – до навантажень кумулятивним вибуховим ядром; б – після навантажень кумулятивним вибуховим ядром – область внесеної тріщинуватості 1, область природної тріщинуватості 3. Область ущільнення 2 відсутня

Глибина внесеної технологічної тріщинуватості для граніту склала 5...10 мм, рис. 9 б. Рентгенографічні зображення пісковика свідчать про його ущільнення під дією навантажень, на що вказує так звана «біла тінь» 1, рис. 9 б.

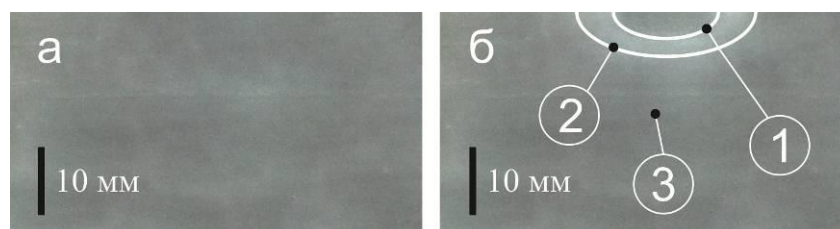


Рис. 9. Рентгенографічне зображення зразка пісковика: а – до навантажень кумулятивним вибуховим ядром; б – після навантажень кумулятивним вибуховим ядром – область внесеної тріщинуватості 1, область ущільнення «біла тінь» 2, область природної тріщинуватості 3

Ущільнення пояснюється наявністю пластичного глинисто-слюдистого цементу у складі пісковика та природної тріщинуватості близько 3,0 %. Верхня частина області ущільнення 2, поглиблюючись з 1 до 3 мм темніє, що відображає появу внесеної технологічної тріщинуватості 1 глибиною до 3 мм, рис. 9 б. Глибина внесеної технологічної тріщинуватості для пісковика не перевищує 5 мм.

Для підтвердження глибини проникнення технологічної тріщинуватості проведено капілярну дефектоскопію (використано пенетрант MR68C та проявник MR70) зразка граніту. Дефектоскопія спочатку проведена на поверхні граніту, рис. 10 а. Потім зразок розрізано навпіл по лінії епіцентра вибуха для дослідження поперечних перерізів граніту, рис. 10 б. Шліфування поверхонь проведено згідно з вимогами капілярної дефектоскопії для чіткого виявлення тріщин. З отриманих результатів встановлено, що під дією кумулятивного вибухового ядра на поверхні формуються тріщини, рис. 10 а, б. При цьому чітко виражено лише одну тріщину, рис. 10 а. Це пояснюється тим, що тріщина має ширину розкриття 30 мкм та глибину 10 мм, рис. 10 б. Глибина тріщин 10 мм підтверджується рентгенографічною зйомкою граніту, рис. 8 б.

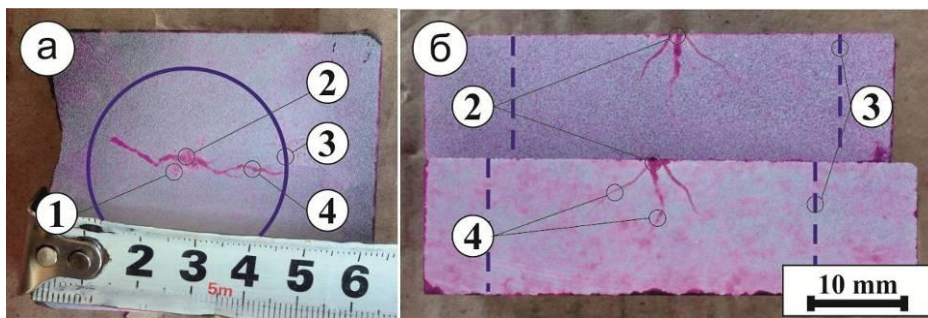


Рис. 10. Результати капілярної дефектоскопії зразка граніту після навантаження кумулятивним вибуховим ядром: а – поверхня зразка граніту; б – поперечні розрізи зразка граніту в епіцентрі вибуха; 1 – зколи; 2 - епіцентр вибуха; 3 – контур ріжучого інструменту комбінованої дії; 4 – мікротріщини

Для фіксації інших дефектів, невиявлених капілярною дефектоскопією, проведено мікроскопічну зйомку поверхні зразка в межах впливу ріжучого інструмента комбінованої дії, рис. 11.

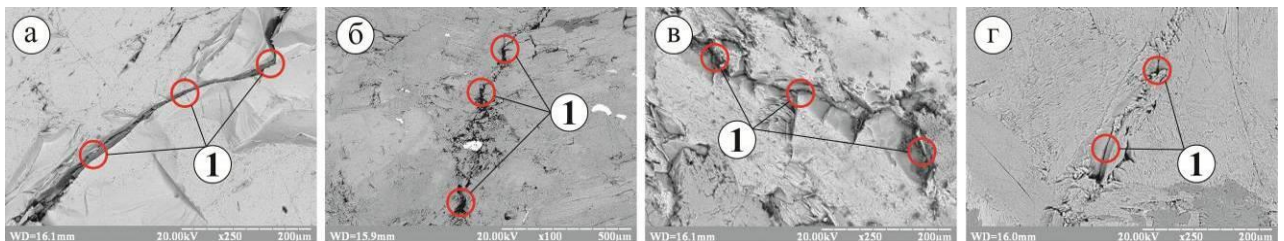


Рис. 11. Мікроскопічна зйомка граніту після навантажень кумулятивним вибуховим ядром: а – в епіцентрі вибуха; б – 5 мм від епіцентра вибуха; в – 10 мм від епіцентра вибуха; г – 20 мм від епіцентра вибуха (1 – мікротріщини)

Зйомка проведена в чотирьох точках зразка: 1 – в епіцентрі вибуха; 2 – в 5 мм від епіцентра вибуха; 3 – в 10 мм від епіцентра вибуха; 4 – в 20 мм від епіцентра

вибуха. Результати досліджень підтверджують появу тріщин по периметру області руйнування ріжучого інструмента комбінованої дії діаметром 36 мм, рис. 11 а, б, в, г. Встановлені тріщини мають ширину розкриття 1,1...4,7 мкм тому не виявлені капілярною дефектоскопією.

Створено експериментальний пристрій (рис. 12), що забезпечив реалізацію вибухо-механічного руйнування гірських порід.

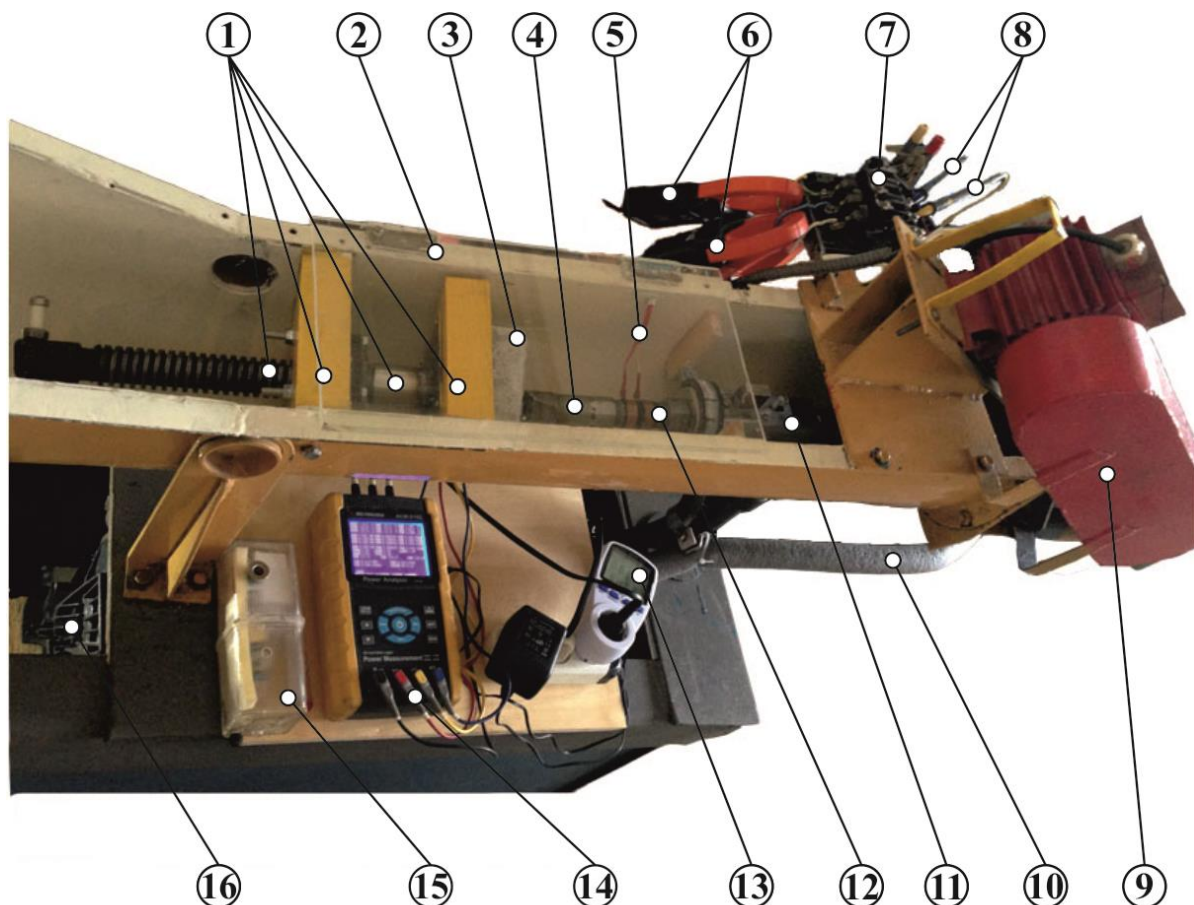


Рис. 12. Експериментальний пристрій: 1 – модель вибою; 2 – захисний екран; 3 – зразок гірської породи; 4 – ріжучий інструмент комбінованої дії; 5 – електроди для подачі напруги 220 В на вибій; 6 – кліщі струмові; 7 – магнітний пускач; 8 – тестові пробники; 9 – електричний привід; 10 – шланг для подачі стисненого повітря в продувний канал; 11 – вертлюг модифікований; 12 – контактні пластини передачі напруги на вибій; 13 – ватметр EU TS-836A, 220 В; 14 – аналізатор електромережі Актаком АСМ 3192; 15 – блок управління компресором; 16 – компресор.

Принцип дії полягає у наступному. За допомогою магнітного пускача 7 запускається електричний привід 9. Встановлюється кутова швидкість 22 рад/с. Обертанням ручки гвинта моделі вибою 1, до ріжучого інструменту подається платформа зі зразком гірської породи 3. Зусилля подачі фіксується на рівні 2,4 кН. Після початку руйнування ручка затвору 9 зводиться механічно для подачі заряду вибухової речовини до продувного каналу. Під тиском стисненого повітря заряд вибухової речовини просувається до ріжучого інструменту 4. Детонація відбувається внаслідок контакту електродного кільця заряду (рис. 1) з електродами в

каналі ріжучого інструменту. Напруга підводиться електродами 5. При цьому знімаються показники аналізатора електромережі та ватметра для розрахунку енергоємності. Після досягнення необхідної глибини руйнування, магнітним пускачем 7 пристрій вимикається. За отриманими показниками потужності, часом руйнування та розмірами сформованого шпура визначається питома енергоємність руйнування.

На експериментальному пристрої (рис. 12) досліджено залежності питомої енергоємності руйнування гірських порід від частоти навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром та температури вибуху, рис. 13 а, б.

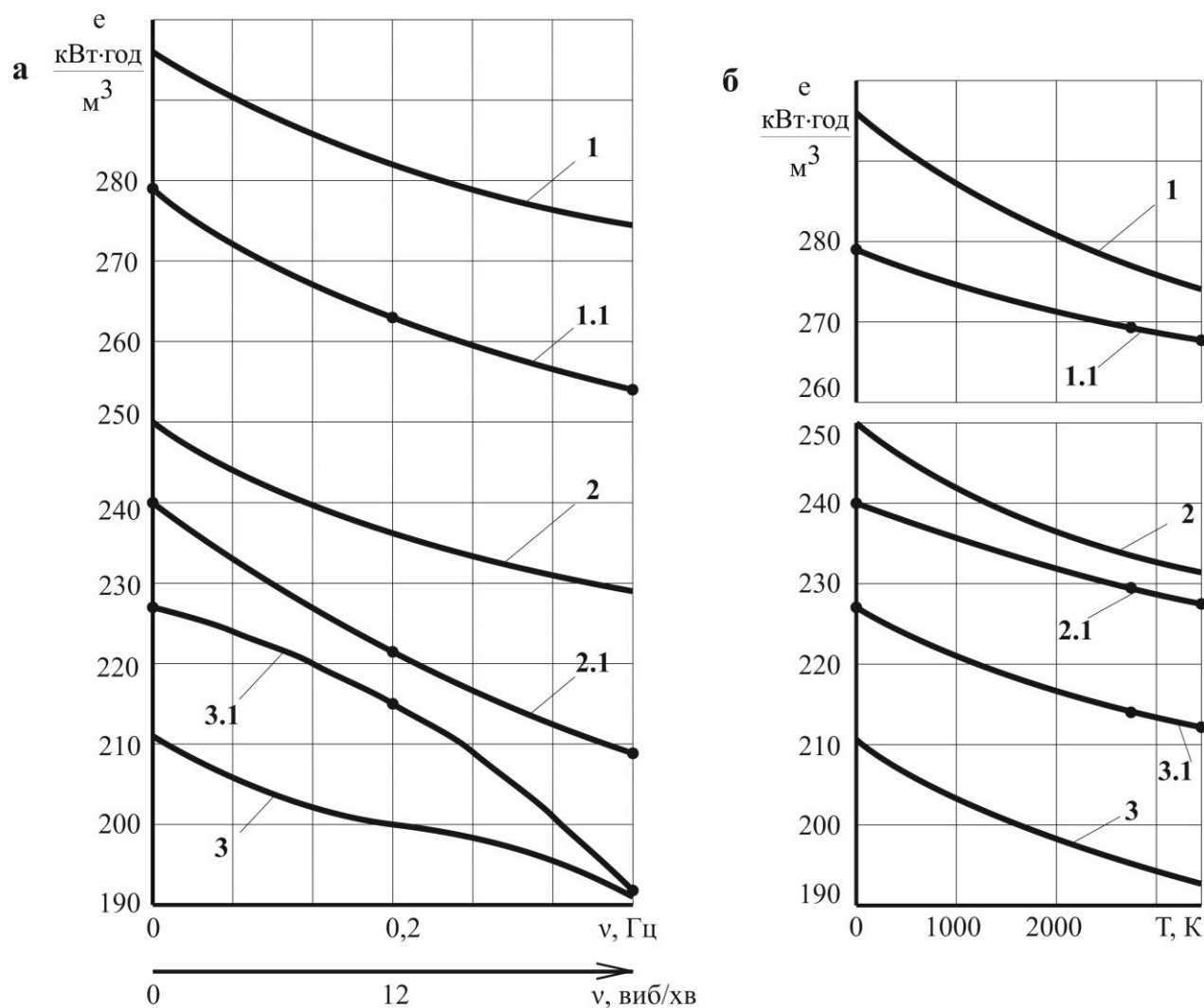


Рис. 13. Залежності енергоємності руйнування гірських порід вибухо-механічними навантаженнями від: а – частоти навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром; б – температури вибуху (1 – габро аналітика; 1.1 – габро експеримент; 2 – граніт аналітика; 2.1 – граніт експеримент; 3 – пісковик аналітика; 3.1 – пісковик експеримент)

Залежності для габро 1 та граніту 2 мають спадаючий експоненціальний характер, рис. 13 а. Для пісковика залежність характеризується квадратичною функцією, що пояснюється його ущільненням за рахунок пластичного глинисто-

слюдистого середовища та пористості близько 3,0 %. Ущільнення пісковика також підтверджено областю 2 на рентгенографічному зображенні, рис. 9 б. Максимальна розбіжність між теоретичними та експериментальними залежностями складає для габро та пісковика 8 %, для граніту 9 %. Мінімальна розбіжність рівна для габро 6 %, для граніту 4 %, для пісковика 4 %.

Експериментальне зниження енергоємності руйнування від частоти навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром, рис. 13 а, відбулось в межах для: габро з 279 до 254 кВт·год/м<sup>3</sup>, або на 9 %; граніту з 240 до 209 кВт·год/м<sup>3</sup>, або на 13 %; пісковика з 227 до 192 кВт·год/м<sup>3</sup>, або на 15 %.

Залежності енергоємності руйнування зразків гірських порід від температури вибуху мають експоненціальний характер, рис. 13 б. Досягнуто зниження енергоємності для: габро на 4 % від 279 кВт·год/м<sup>3</sup>; граніту на 5 % від 240 кВт·год/м<sup>3</sup>; пісковика на 7 % від 227 кВт·год/м<sup>3</sup>. Максимальна розбіжність між теоретичними та експериментальними залежностями склала для габро 6 %, для граніту 4 %, для пісковика 10 %. Мінімальна розбіжність рівна для габро 2 %, для граніту 1%, для пісковика 7 %.

Адекватності математичної моделі реальним процесам вибухо-механічного руйнування гірських порід проведена за критерієм Фішера. Отримані розрахункові (1,46 в.о.; 1,26 в.о.) та табличні (2,46 в.о.; 2,57 в.о.) значення критерія Фішера відповідають умові  $F_{роз} < F_{табл}$ , а отже підтверджують адекватність математичної моделі.

Час на руйнування  $1 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup> зразків гірських порід знизився: з 6,5 хв до 5,9 хв, або на 9 % для габро; з 4,3 хв до 3,7 хв, або на 13 % для граніту; з 4,1 хв до 3,5 хв, або на 15 % для пісковика. Відповідно зросла швидкість руйнування зразків габро, граніту та пісковика на 9 % від 9,23 м/год, 13 % 13,95 м/год та на 14 % від 14,63 м/год.

**У п'ятому розділі** наведено результати промислової апробації вибухо-механічного руйнування гірських порід. Апробація вибухо-механічного способу руйнування гірських порід відбулась у технологічному процесі ПП «Давидівський гранкар'єр». У результаті досягнуто: зниження енергоємності руйнування гранітів з 201 кВт·год/м<sup>3</sup> до 188 кВт·год/м<sup>3</sup>, внаслідок формування додатково до природної, внесеної технологічної тріщинуватості вибою. Встановлено, що зниження питомої енергоємності руйнування граніту з 201 кВт·год/м<sup>3</sup> до 188 кВт·год/м<sup>3</sup> сприяє зниженню викидів СО<sub>2</sub> на 6 % від 90,45 кг. Коефіцієнт корисної дії зріс з 0,77 в.о. до 0,80 в.о. Знижено питомі витрати вибухової речовини з 28,60 кг/м<sup>3</sup> до 13,12 кг/м<sup>3</sup> за рахунок концентрації кумулятивного вибухового ядра на вибій.

Річний економічний ефект від впровадження вибухо-механічного руйнування гірських порід на ПП «Давидівський гранкар'єр» склав 25280 грн. та буде уточнюватись протягом двох років, починаючи з 2016. Період окупності впровадження вибухо-механічного руйнування гірських порід рівний 1 рік 3 місяці.

## ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка вирішила науково-технічну задачу щодо зниження питомої енергоємності руйнування гірських порід вибухо-механічним навантаженням кумулятивним вибуховим ядром за рахунок доповнення природної тріщинуватості вибою внесеною технологічною.

Основні наукові та практичні результати досліджень полягають в наступному:

1. Аналітично встановлено та експериментально підтверджено:

- зниження питомої енергоємності руйнування від частоти навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром за поліноміальним законом, а саме:

- з 279 до 254 кВт·год/м<sup>3</sup> або на 9 % для габро;

- з 240 до 209 кВт·год/м<sup>3</sup> або на 13 % для граніту;

- з 227 до 191 кВт·год/м<sup>3</sup> або на 16 % для пісковика.

- зниження питомої енергоємності руйнування від температури вибуху за експоненціальним законом, а саме:

- габро на 4 % з 279 до 267 кВт·год/м<sup>3</sup>;

- граніту на 6 % з 240 до 227 кВт·год/м<sup>3</sup>;

- пісковіку на 7 % з 227 до 211 кВт·год/м<sup>3</sup>.

2. Досягнуто зниження питомої витрати вибухової речовини з 28,60 кг/м<sup>3</sup> до 13,12 кг/м<sup>3</sup> за рахунок концентрації кумулятивного вибухового ядра на вибій.

3. Визначено, що за зміною модуля пружності I роду раціональне співвідношення вибухових та механічних навантажень становить відповідно 31 % та 69 % для габро; 28 % та 72 % для граніту; 37 % та 63 % для пісковика.

4. Забезпечено зростання швидкості руйнування в лабораторних умовах: на 9 % від 9,23 м/год для габро; на 13 % від 13,95 м/год для граніту; на 14 % від 14,63 м/год для пісковика.

5. Досягнуто у виробничих умовах зниження питомої енергоємності руйнування граніту вибухо-механічним способом за рахунок доповнення природних тріщин внесеними технологічними кумулятивним вибуховим ядром з 201 до 188 кВт·год/м<sup>3</sup>.

6. В результаті впровадження вибухо-механічного руйнування гірських порід на створеному повнорозмірному експериментальному пристрої коефіцієнт корисної дії зріс з 77 % до 80 %.

7. Економічний ефект вибухо-механічного руйнування, впровадженого у виробничих умовах складає 25280 гривень. Орієнтовний період окупності впровадження вибухо-механічного руйнування гірських порід рівний 1 рік 3 місяці. Новизна проведених досліджень підтверджена патентом України (№ 107732 UA, E21B 7/00) «Спосіб комбінованого вибухо-механічного руйнування гірських порід».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Статті у фахових виданнях:*

1. Терентьев О.М. Формування комбінованого руйнування гірських порід вибухо-механічними навантаженнями [Текст] / О.М. Терентьев, П.А. Гонтарь, А.Й. Клещов // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2014. – Ч. 1, № 6 (89). – С. 131 – 136. (включено до баз даних «Україніка наукова», «Ulrich's Web Global Serials Directory», «eLIBRARY», «Index Copernicus», «Polish Scholarly Bibliography», «Infobase Index», «Inspec», «Open Academic Journals Index», «Google Scholar», «CiteFactor» і «Scientific Indexing Services».)

*Здобувачем проведено системний аналіз способів комбінованого руйнування гірських порід, виділено їх недоліки та переваги.*

2. Терентьев О.М. Энергоемкость взрыва - механического разрушения горных пород [Текст] / О.М. Терентьев, П.А. Гонтарь // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2014. – № 2 – С. 31 – 36. (включено до баз даних «Наукова періодика України», РІНЦ, «Google Scholar».)

*Здобувач розробив конструкцію експериментального пристрою та ріжучого інструменту вибухо - механічної дії.*

3. Terentiev O. Rocks fracturing with explosive-mechanical means [Text] / O. Terentiev, P. Gontar // Вісник Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво». – 2015. – Вип. 28 – С. 71 – 76. (включено до баз даних «BASE», «WorldCat», «Google Scholar», «OpenAIRE», «Research Bible», «UIF», «OAJI».)

*Здобувачем встановлено зниження швидкості ультразвукових хвиль в зразках гірських порід від частоти навантажень кумулятивним вибуховим ядром.*

4. Терентьев О. Планування експерименту руйнування кристалічних структур потоками індуктивної плазми [Текст] / О. Терентьев, А. Клещев, П. Гонтарь // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2015. – № 1. – С. 134 – 142.

*Здобувачем проведено статистичну обробку експериментальних даних.*

5. Терентьев О.М. Энергетичні параметри кумулятивного вибухового ядра під час вибухо-механічного буріння [Текст] / О.М. Терентьев, П.А. Гонтарь, А. Шукуров // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2016. – № 5. – С. 17 – 23. (включено до баз даних WorldCat, Google Scholar, OpenAIRE, РІНЦ, EBSCO.)

*Здобувач визначив енергетичні параметри кумулятивного вибухового ядра.*

### *Патенти:*

6. Патент на винахід 107732 UA, МПК E21B, 7/00. Спосіб комбінованого руйнування гірських порід / Терентьев О.М., Кравець В.Г., Гонтарь П.А. - №а201305953; заявл. 13.05.2013; опубл. 10.02.2015. Бюл. №22. – 5 с.

*Здобувачем створено формулу патенту на винахід «Спосіб комбінованого руйнування гірських порід»*

*Тези доповідей на конференціях:*

7. Терентьев О.М. Зниження енергоємності руйнування гірських порід впливом комбінованих навантажень [Текст] / О.М. Терентьев, П.А. Гонтарь // *Инновационные технологии разработки месторождений полезных ископаемых* (3-5 апреля, 2013 г., г. Донецк): сборник научных трудов. – Донецк: ДонНТУ. – 2013. – С. 109 – 111.

*Здобувач обґрунтував актуальність вибухо-механічного навантаження гірських порід на основі системного аналізу із застосуванням теорії графів.*

8. Терентьев О.М. Анализ критериев энергоэффективного разрушения горных пород [Текст] / О.М. Терентьев, П.А. Гонтарь // *Перспективы развития горного дела и подземного строительства* (23-24 мая, 2013 г., Киев): материалы V научно-технической конференции «Энергетика, экология, человек». – Киев: НТУУ «КПИ». – 2013. – С. 174 – 179.

*Здобувачем проаналізовано критерії руйнування гірських порід щодо енергоефективності.*

9. Терентьев О.М. Математическая модель комбинированного разрушения горных пород взрыво - механическими нагрузками [Текст] / О.М. Терентьев, П.А. Гонтарь // *Theoretikal & applied science. Materials of the International Scientific Practical Conference* 28.02.2014. Sweden. Lonkoping. – P. 48 – 53.

*Здобувач провів математичне моделювання вибухо-механічного руйнування гірських порід.*

10. Терентьев О.М. Взрыво - механическое разрушение горных пород [Текст] / О.М. Терентьев, П.А. Гонтарь // *II Аспірантські читання 2014 пам'яті А.В. Праховника: збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної, 16-17 квітня, 2014 р., Київ.* – Інститут енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПИ». – С. 14 – 15.

*Здобувач запропонував класифікаційну схему з 12-вершинним графом.*

11. Терентьев О.М. Комбинированное разрушение горных пород взрыво - механическими нагрузками [Текст] / О.М. Терентьев, П.А. Гонтарь // *Проблемы недропользования* (23-25 апреля 2014 р., г. Санкт-Петербург): сборник научных трудов. – СПб: Национальный минерально-сырьевой университета «Горный». – 2014. – Ч. 1. – С. 175 – 177.

*Здобувачем обґрунтовано вибір базового критерію руйнування гірських порід комбінованими навантаженнями.*

12. Терентьев О.М. Вибухо-механічне руйнування гірських порід концентрованим ударним ядром [Текст] / О.М. Терентьев, П.А. Гонтарь // *Матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина».* Інституту енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПИ», 2015. – С. 419 – 424.

*Здобувачем розроблено конструкцію зарядів вибухової речовини для реалізації вибухо-механічного руйнування гірських порід.*

## АНОТАЦІЯ

**Гонтарь П.А.** Удосконалення технології механічного руйнування гірських порід використанням кумулятивного вибухового ядра. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.03 – відкрита розробка родовищ корисних копалин. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2017.

Дисертаційна робота присвячена розробці нового енергоефективного вибухо-механічного способу руйнування гірських порід з використанням кумулятивного вибухового ядра.

Розроблено математичну модель енергоємності руйнування гірських порід, що враховує параметри вибухо-механічного навантаження вибою і сукупність дії природної та внесеної технологічної тріщинуватостей.

Створено повнорозмірний експериментальний пристрій для реалізації комбінованого вибухо-механічного руйнування гірських порід. Пристрій дозволив експериментально встановити зниження питомої енергоємності вибухо-механічного руйнування гірських порід від частоти навантажень кумулятивним вибуховим ядром (на 9...16 %) та температури вибуху (на 4...7 %). При цьому забезпечено зростання коефіцієнта корисної дії з 77 % до 80 % та продуктивності руйнування гірських порід на 9...14 %.

Результати досліджень апробовано в технологічному процесі ПП «Давидівський гранкар'єр». Досягнуто зниження питомої енергоємності руйнування граніту з 201 до 188 кВт·год/м<sup>3</sup> вибухо-механічним способом за рахунок доповнення природних тріщин внесеними технологічними кумулятивним вибуховим ядром.

**Ключові слова:** вибухо-механічне руйнування, енергоємність руйнування, кумулятивне вибухове ядро, комбіновані навантаження, руйнування гірських порід.

## АННОТАЦИЯ

**Гонтарь П.А.** Усовершенствование технологии механического разрушения горных пород использованием кумулятивного взрывного ядра. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.15.03 – открытая разработка месторождений полезных ископаемых. Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, Киев, 2017.

Диссертационная работа посвящена разработке нового энергоэффективного взрыво-механического способа разрушения горных пород с использованием кумулятивного взрывного ядра. Предложена новая классификация комбинированных нагружений на забой с использованием теории графов. Это позволило выделить 132 возможных комбинированных способа разрушения горных пород. По результатам системного анализа обосновано рациональное сочетание

механических и взрывных разрушительных нагрузок. Разработано конструктивное исполнение механизма для взрыво-механического разрушения горных пород, а именно: вертлюг модифицированный и режущий инструмент комбинированного действия. Обоснован выбор горных пород для проведения исследований: габбро, гранит, песчаник. Проведено планирование экспериментальных исследований. В качестве целевых функции выбраны зависимости энергоемкости разрушения горных пород от частоты нагружений забоя кумулятивным взрывным ядром и температуры взрыва. Задачей оптимизации исследований выбрано снижение удельной энергоемкости взрыво-механического разрушения горных пород за счет дополнения природной трещиноватости внесенной технологической. В качестве фактором, влияющих на энергоемкость взрыво-механического разрушения горных пород выбраны предел прочности на сжатие, температуру взрыва и частоту нагружений кумулятивным взрывным ядром. Использован центральный композиционный план, ядром которого есть полный факторный эксперимент типа 2k. Согласно составленной матрице планирования предусмотрено проведение 60 исследований с учетом повторных 4 по распределению Стьюдента.

Проведен системный анализ энергетических, силовых и деформационных критериев разрушения, по результатам которого разработан базовый критерий взрыво-механического разрушения горных пород. Критерий дополнен энергией активации разрушения горных пород, кинетической энергией кумулятивного взрывного ядра, тепловой энергией взрыва, энергией механического разрушения горных пород. В результате получена математическая модель энергоемкости разрушения горных пород, которая учитывает параметры взрыво-механического нагружения забоя и совокупность действия природной и технологической трещиноватостей. Математическим моделированием получены аналитические зависимости энергоемкости разрушения горных пород от частоты нагружений забоя кумулятивным взрывным ядром и температуры взрыва. Энергоемкость снизилась на 9 % для габбро, на 8 % для гранита, на 10 % для песчаника.

Исследовано снижение упругих свойств горных пород с ростом частоты нагружений кумулятивным взрывным ядром (0...24 взрыв/мин). А именно: скорость распространения ультразвуковых волн снизилась на 2...8 %, модуль упругости I рода – на 28...37 %.

Создано полноразмерное экспериментальное устройство для реализации комбинированного взрыво-механического разрушения горных пород. Устройство позволило экспериментально установить снижение удельной энергоемкости взрыво-механического разрушения горных пород от частоты нагружений кумулятивным взрывным ядром (на 9...16 %) и температуры взрыва (на 4...7 %). При этом обеспечен рост коэффициента полезного действия с 77 % до 80 % и производительности разрушения горных пород на 9...14 %.

Результаты исследований апробированы в технологическом процессе ЧП «Давыдовский гранкарьер». Достигнуто снижение удельной энергоемкости разрушения гранитов с 201 до 188 кВт·год/м<sup>3</sup> взрыво-механическим способом за счет дополнения природных трещин внесенными технологическими кумулятивным взрывным ядром.

**Ключевые слова:** взрыво-механическое разрушение, энергоёмкость разрушения, кумулятивное взрывное ядро, комбинированное нагружение, разрушение горных пород.

## ABSTRACT

**Gontar P.A.** Mechanical rocks destruction technology improving using cumulative explosive warhead. – Manuscript.

The dissertation for the candidate of engineering science degree (comparable to the Academic Degree of Doctor of Philosophy) on specialty 05.15.03 – opencast mining operation. – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2017.

The dissertation is dedicated to developing new energy-efficient explosive-mechanical method of rock destruction with cumulative explosive warhead usage. Specific power consumption decreasing of explosive-mechanical rock destruction due to addition natural fractures with technological one was chosen as optimization objective.

The mathematical model of energy consumption of rock destruction, which includes parameters of explosive-mechanical stressing and complex of natural and technological fractures influence, was developed.

Experimentally investigated decreasing of rocks' elastic properties with cumulative explosion warhead influence frequency increasing (0...24 explosions per minute). Namely: ultrasonic waves speed was decreased on 2...8 %; Young's modulus – on 28...37 %.

The full-size experimental device for combined explosive-mechanical rock destruction method with cumulative explosive warhead implementation was created. The device allowed to determine decreasing of rock destruction specific energy consumption from cumulative explosion warhead stressing frequency (on 9...16 %) and temperature of explosion (on 4...7 %). Herewith it was achieved efficiency increasing from 77 % to 80 % and rocks destruction performance on 9...14 %.

The results of researches were approved in technological process of LLC «Davidivskiy grankar'er». It was reached granite destruction specific energy consumption decreasing from 201 kW·h/m<sup>3</sup> to 188 kW·h/m<sup>3</sup> by explosive-mechanical rocks destruction method due to addition natural fractures with technological one by cumulative explosion warhead.

**Keywords:** explosive-mechanical destruction, energy consumption of destruction, cumulative explosion warhead, combined stressing, rocks destruction.

Гонтарь Павло Анатолійович

**Удосконалення технології механічного руйнування гірських порід  
використанням кумулятивного вибухового ядра**

05.15.03 – відкрита розробка родовищ корисних копалин

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук