

ЕНЕРГЕТИКА ТА НОВІ ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.20535/1810-0546.2018.4.141464

УДК 622

А.П. Кичигін, О.М. Терентьев, В.О. Поліщук*

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

МЕХАТРОННА СИСТЕМА ЕНЕРГООЩАДНОГО РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД

Проблематика. Розглянуто можливість зниження енергоємності руйнування гірських порід за рахунок сукупності внесеної штучної тріщинуватості вибою додатково до існуючої природної його тріщинуватості. Дослідження виконувалось відповідно до “Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року” (Закон України від 21 квітня 2011 року № 3268-VI).

Мета дослідження. Зниження енергоємності руйнування гірських порід енергоощадними мехатронними системами.

Методика реалізації. Застосовано: *метод індукції* для визначення спільних недоліків існуючих теорій руйнування гірських порід; метод Джордано—Гаусса дав змогу визначити домінуючі умови руйнування кристалічних структур вапняків, гнейсів, мергелів, пісковиків, гранітів; метод синтезу дав змогу визначити енергетичний критерій у системі руйнування зовнішнім енергетичним потоком; метод теоретичного моделювання слугував для визначення залежності модуля пружності I роду та питомої енергоємності від технологічних параметрів, енергетичного потоку та параметрів кристалічних структур гірських порід; експериментальний метод дав змогу підтвердити аналітичні залежності модуля пружності I роду та питомої енергоємності від параметрів зовнішнього енергетичного потоку і параметрів кристалічних структур породного масиву.

Результати дослідження. Встановлено, що основними параметрами, які впливають на процес руйнування твердого тіла, є характеристики і питома поверхнева енергія. Експериментальна перевірка запропонованої моделі показала, що при збільшенні швидкості різання від 4 до 12 м/с питома поверхнева енергія зменшується від 6 до 0,3 Дж/м² для гнейсу, від 0,69 до 0,03 Дж/м² для мергелю, від 0,41 до 0,02 Дж/м² для граніту. При збільшенні відстані між ріжучими кромками робочого інструмента від 0,01 до 0,08 м питома поверхнева енергія зменшилася від 0,8 Дж/м² до 0,5 Дж/м².

Висновки. Створено мехатронну систему обертового магніто-гідрокавітаційного буріння гірських порід, яка пройшла промислові випробування на кварцитовому кар’єрі Товкачівського гірничо-збагачувального комбінату. Знижено енергоємність руйнування кварцитів з 95,0 до 87,5 кВт·год/м³ (8%). Річний економічний ефект від впровадження становить 27 000 грн. Строк окупності 2 місяці.

Ключові слова: енергоємність руйнування гірських порід; внесена тріщинуватість; питома поверхнева енергія руйнування; магніто-гідрокавітаційне навантаження; обертове магніто-гідрокавітаційне буріння гірських порід.

Вступ

Руйнування гірських порід, удосконалення старих і розробка нових способів є актуальною науково-технічною задачею. До цього часу у вітчизняній гірничій промисловості використовуються способи руйнування, що мають високу питому енергоємність у декілька тисяч мегаджоулів на метр кубічний. Такими поширеними способами є гідравлічний, електротермічний, плазмовий, термодушковий тощо. Способи руйнування, що потребують меншої енергоємності, мають низку недоліків. Так, використання механічного руйнування обмежене міцністю порід до 6 за шкалою Протоцьконова, вибухове супроводжується утворенням сейсмічних хвиль, забрудненням довкілля. То ж до сьогодні задача розробки енергоощадних сис-

тем для руйнування гірських порід залишається актуальною. Дослідження виконувалось відповідно до “Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року” (Закон України від 21 квітня 2011 року № 3268-VI).

Створення нового математичного апарату та його практична апробація дають змогу врахувати технологічні та фізико-механічні показники руйнування гірських порід. Для цього розглянуто руйнування гірських порід від дії сукупності внутрішніх та зовнішніх навантажень на молекулярному рівні.

Аналіз існуючих теорій руйнування гірських порід В. Бонда, Г. Ірвіна, В.Л. Кирпичова, Ш. Кулона—Т. Мора, Е. Орована, А. Треска, Л. Прандтля, П.О. Ребіндера, Й. Ретінгера, А. Шлейхера та інших показав, що вони базу-

* corresponding author: valemp@ukr.net

ються на механіці суцільних середовищ та не враховують молекулярної будови породи. Наявність вказаних недоліків призводить до збільшення енерговитрат і зниження ККД.

Постановка задачі

Метою дослідження є зниження енергоємності руйнування гірських порід енергоощадними мехатронними системами.

Для досягнення поставленої мети сформульовані такі задачі: аналіз залежності енергоємності руйнування від питомої поверхневої енергії руйнування гірських порід; одержання залежностей питомої енергоємності комбінованого руйнування гірських порід від потужності приводу подачі та різання мехатронної системи; встановлення зміни модуля пружності першого роду від енергії молекулярних зв'язків кристалічних структур.

Огляд існуючих рішень поставленої задачі

Математичні моделі для вирішення різних завдань теорії руйнування представлені в працях А. Гріффітса, С.Н. Журкова, Г. Ірвіна, Ш. Кулона, Т. Мора, В. Новацького, Е. Орована, В.В. Панасюк, Л. Прандтля, А. Сен-Венана, А. Треска, О.О. Фрідмана, Є.І. Шемякіна, А. Шлейхера та інших. Дослідження механіки руйнування твердих тіл розпочато в роботах А. Гріффітса (початок ХХ ст.). У його праці [1] вперше процес руйнування пов'язаний не з константами матеріалу, а з довжиною тріщин. А. Гріффітс висунув гіпотезу, що тріщина в твердому тілі розвивається під навантаженням за умови, що швидкість вивільнення потенційної енергії деформації більша приросту питомої поверхневої енергії (ППЕ) тіла. Проведеними дослідженнями підтверджено й формалізовано вплив зовнішньої енергії на ефективність розкриття магістральної тріщини при руйнуванні гірських порід. Так, порівняння класичних математичних моделей [4–9], наведених у табл. 1, з отриманою в роботі моделлю свідчить, що між ними немає істотних розбіжностей.

Усі моделі табл. 1. містять однакову залежність міцності від параметра $G\xi/L$, схожого на параметр, що входить у рівняння А. Гріффітса. Це свідчить про схожість розуміння процесів руйнування матеріалів, описаних різними авторами.

Таблиця 1. Напруга, яка необхідна для зародження тріщини в породному масиві

Модель	Формула критичного напруження
Гука	$\sigma = P/S$
Гріффітса [4]	$\sigma_p = 0,5(\varepsilon E/L)^{1/2}$
Зінера–Стро [5, 6]	$\sigma_s^2 = 3\pi G\xi / (8(1-\nu)L)$
Коттрелла [7]	$\sigma_s \sigma_n \cong 2G\xi / (\pi(1-\nu)L)$
Баллафа–Гілмана [8]	$\sigma_s \sigma_n \cong (4\sqrt{2}\pi) \times$ $\times [(1+\nu)/(1-\nu)]^{0,5} (G\xi/L)$
Орована–Стро [9]	$\sigma_s \sigma_n = (4/\pi)(G\xi/L)$

Примітки. P – зусилля руйнування; S – площа, до якої прикладене руйнівне навантаження; σ_p – напруга розриву; σ_s – наведена дотична напруга (компонента зовнішньої напруги) мінус локальне значення напруги тертя за Петчем [10]; σ_n – локальна нормальна напруга; G – модуль пружності другого роду; L – довжина тріщини; ξ – поверхнева енергія на одиницю площі; ν – коефіцієнт Пуассона; E – модуль пружності першого роду.

Методи дослідження

При проведенні дослідження були використані такі методи: *методом індукції* визначено спільні недоліки існуючих теорій руйнування гірських порід; *методом Жордано–Гаусса* визначено домінуючі умови руйнування кристалічних структур вапняків, гнейсів, мергелів, пісковиків, гранітів; *методом синтезу* визначено енергетичний критерій руйнування зовнішнім енергетичним потоком; *методом теоретичного моделювання* визначено залежності модуля пружності першого роду та питомої енергоємності від технологічних параметрів, енергетичного потоку та параметрів кристалічних структур гірничих порід; *експериментальним методом* підтверджено аналітичні залежності модуля пружності першого роду та питомої енергоємності від технологічних параметрів, параметрів зовнішнього енергетичного потоку та параметрів кристалічних структур породного масиву.

Вимірювальні прилади та чутливі елементи для проведення досліджень мехатронної системи енергоощадного руйнування гірських порід наведені у табл. 2.

Обґрунтування вибраних для проведення досліджень мехатронної системи енергоощадного руйнування гірських порід вимірювальних приладів і чутливих елементів. Експериментально зна-

Таблиця 2. Засоби вимірювання для проведення експерименту

Величина, яка вимірюється	Назва приладу	Діапазон вимірювання	Похибка
Дефектоскопія зразків гірських порід до та після зовнішніх навантажень			
Швидкість ультразвукових хвиль	УИСУ-01 (ГОСТ 14782–86)	1,7–7 км/с	±0,05 %
Модуль Юнга	Мікротвердомір “Мікрон-гамма” (ISO/FDIS 14577-1:2002)	0–400 ГПа	±0,5 %
Мікротопографія поверхні	3D-профілограф “Мікрон-альфа” (ГОСТ 5.425–70)	0–40 мкм	–
Рентгенографічна дефектоскопія	Рентгенодефектоскопічний апарат РАП 150/300 (ГОСТ 7512–92)	250 мм	–
Капілярна дефектоскопія	Розчинник MR 88; пенетрант MR68 C; проявник MR 70 (ДСТУ EN 571-1)	1–10 мкм	–
Мікроскопічна зйомка	Растровий електронний мікроскоп РЕМ-106И (У2126-05)	15–100000 разів	40 нм
Параметри експериментальної установки			
Потужність (380 В)	Аналізатор електромережі АКТАКОМ АСМ 3192	0,00–9,99 МВт	±1 %
Потужність (220 В)	Ватметр EU TS-836A	0,0–3,6 кВт	–
Зусилля подачі	Датчик тензометричний ВМ24R	0,6–2,8 кН	–

чення ППЕ визначатиметься через модуль пружності першого роду, відстань між сусідніми площинами розщеплення та радіус дії молекулярних зв'язків. Для вимірювання модуля пружності першого роду використано неруйнівний метод наноіндентування [11] установкою “Мікрон-гамма”. При визначенні модуля пружності першого роду використано індентор Берковича. Діапазон діючої на індентор сили – 0,01–5 Н, глибина занурення $h = 0,01–200$ мкм, швидкість навантаження – 0,01–100 Н/с, час витримування зразка під навантаженням – 0–600 с, діапазон сканування 30×30 мм, швидкість сканування – 20–60 мкм/с.

Радіус дії молекулярних сил та відстань між сусідніми площинами розщеплення визначатимуться за допомогою рентгеноструктурного дифрактометра “RegakuUltima IV”.

Поява комплексної тріщинуватості в гірських породах унаслідок зовнішнього навантаження породного масиву оцінена методом ультразвукової дефектоскопії [12] на базі установки УИСУ-01. Установка дає змогу проводити вимірювання зразків товщиною до 100 мм. Результати вимірювань виводяться на осцилографічний екран програмного забезпечення “УЗ-контроль”, що забезпечує технологічність і автоматизацію процесу.

Для візуального встановлення дефектів зразків гірської породи внаслідок дії зовнішніх

навантажень застосовано метод капілярної дефектоскопії згідно з ГОСТ 23349–78 [13].

Визначення глибини проникнення комплексної тріщинуватості проведено методом рентгенографічного контролю зразків гірських порід [13]. Застосовано рентгенодефектоскопічний апарат РАП 150/300, що дає можливість просвічувати зразки товщиною до 250 мм.

Перевірка поверхні зразків на предмет формування внесених технологічних тріщин проведена растровим електронним мікроскопом РЕМ-106И.

Перевірка мікротопографії поверхні зразків гірських порід до та після навантажень проведена безконтактним інтерференційним 3D-профілографом “Мікрон-альфа”.

Повна потужність під час руйнування зразків гірських порід фіксувалась за допомогою професійного аналізатора електромережі АКТАКОМ АСМ 3192. Результати вимірювань потужності (діапазон від 0,00 кВт до 9,99 МВт) автоматично зберігаються на SD-карту в форматі Excel.

Подальше визначення питомої енергоємності розраховано діленням значень потужності на об'єм зруйнованої гірничої породи. Геометричні параметри утворених шпурів у зразках гірничої породи визначались за допомогою лазерного далекоміра типу Hilti PD-E (ISO 17123-4:2012).

Визначення потужності та часу роботи компресора забезпечив ватметр EU TS-836A, який працює від мережі 220 В, діапазон вимірювань становить 0–3,6 кВт і має вбудований акумулятор для збереження даних.

Математична модель руйнування гірських порід на квантово-механічному рівні

У наведені класичні моделі руйнування гірських порід, як правило, входять емпіричні величини, частіше отримані в результаті багаторазового експериментування в конкретних виробничих або лабораторних умовах з подальшою математичною обробкою. Нова запропонована модель містить визнані фізичні константи. Така модель охоплює всю сукупність режимів функціонування систем і дає змогу керувати ними в період здійснення технологічних операцій. Запропонована модель висвітлює найбільш енергоємний процес формування ядра ущільнення перед руйнуванням на квантово-механічному рівні.

Встановлено, що основними параметрами, які впливають на процес руйнування твердого тіла, є характеристики і питома поверхнева енергія. При руйнуванні потенційна енергія деформації перетворюється на ППЕ новоутворених частин твердого тіла. На думку авторів [14], у критерії А. Гріффітса не враховано впливу пластичної деформації на процес утворення тріщини. Критерій Е. Орована відрізняється від критерію А. Гріффітса урахуванням ефективної ППЕ, що дає можливість враховувати пластичні деформації.

Аналіз критеріїв руйнування Г. Ірвіна, Е. Орована, А. Гріффітса, С.Н. Журкова та інших показав, що питома поверхнева енергія є одним із ключових чинників руйнування гірських порід і розглядається як незмінна величина. Для розгляду ППЕ як змінної величини потрібна уточнена математична модель з урахуванням технологічних і механічних параметрів руйнування.

Згідно з дослідженнями [1], мірою опору матеріалу руйнуванню є коефіцієнт поверхневого натягу. У механіці руйнування твердого тіла цей коефіцієнт характеризується відношенням енергії на границі матеріалу до одиниці поверхні при постійній температурі і визначає ППЕ. У кількісному вигляді ППЕ є роботою, яка необхідна для створення одиниці нової поверхні матеріалу і яка зумовлює виникнення тріщин. Тріщина зростає після досяг-

нення теоретичної межі міцності. Зростання тріщини відбувається з утворенням нових поверхонь. Їх ППЕ дорівнює роботі міжатомних сил в обсязі a^3 (a – параметр кристалічної решітки, м), віднесеної до площі a^2 [2]. Таким чином, ППЕ є ключовим фактором у процесі руйнування гірських порід і пов'язана з розвитком міжмолекулярних зв'язків. ППЕ з теоретичних досліджень Дж. Гілмана [15], які експериментально підтверджені І. Обреїмовим, набуває вигляду [3]

$$\gamma = Ea_0^2 / (\chi_0 \pi^2), \quad (1)$$

де E – модуль пружності першого роду; α_0 – радіус дії міжмолекулярних сил притягання, м [19]; Y_0 – відстань між сусідніми площинами розщеплення, м.

Згідно з [16], ППЕ дорівнює потенціалу взаємодії між двома, розділеними навпіл площиною Міллера, частинами кристала на одиницю площі. Перевагою (1) є те, що в ній враховані міцності породи через модуль пружності першого роду E , енергетичні параметри взаємодії елементарних частинок через радіус дії міжмолекулярних сил тяжіння α_0 і параметр кристалічної решітки через відстань між сусідніми площинами розщеплення Y_0 . ППЕ проаналізована з точки зору міжатомної взаємодії і враховує енергетичний параметр зв'язків у кристалічних решітках матеріалу. Математична модель визначення ППЕ на молекулярному рівні для площин Міллера з індексами 100, 110 і 111 наведена в праці І.М. Странського і Р. Каїшева [17].

При розробці математичних моделей руйнування гірських порід, континуальний підхід класичної механіки суцільних середовищ не може бути повністю використаний. Тому проведено аналіз молекулярних параметрів гірських порід, які дадуть змогу врахувати дискретність їх атомарної кристалічної будови при руйнуванні.

Для наближення математичної моделі ППЕ до реального процесу руйнування гірських порід запропоновано додатково враховувати технологічний коефіцієнт T_k , в.о.:

$$\gamma = \frac{2\hbar^4 v^4 l_k N_A^2 \varepsilon^2 F^2 T_k}{Y_0 \pi^3 d^4 m^2 V^4 H^2 Z Q \rho \delta}, \quad (2)$$

де $\hbar = 6,6256 \cdot 10^{-34}$ – стала Планка, Дж·с; v – власна частота коливань молекули, Гц; l_k –

критична довжина тріщини, м; $N_A = 6.62 \cdot 10^{23}$ – число Авогадро, моль; $\varepsilon = 10^{-5}$ – деформація зсуву, в.о. [18]; $F = 0,1$ – коефіцієнт тертя породи з робочим інструментом, в.о. [28]; Y_0 – відстань між сусідніми площинами розщеплення за формулою Вульфа–Брегга, м [19]; d – діаметр молекули, м; m – маса молекули, кг; V – швидкість навантаження породного масиву, м/с; $H = 10^{19}$ – загальне число атомів в упакованні кристалів середовища на площі породи 1 м^2 , в.о. [20]; $Z = 10^6$ – кількість атомних шарів у поверхневому шарі тривимірного кристала площею 1 м^2 , для двовимірних кристалів площею 1 м^2 $Z = 10^4$; Q – питома теплоємність плавлення тіла, що руйнується, Дж/кг; ρ – густина матеріалу, що руйнується, кг/м³; δ – товщина поверхневого шару матеріалу, м.

Отримання формули (2) наведено в [20]:

$$T_k = \frac{\sqrt{N_n^2 + N_p^2} t v s P_k \eta_n \arctg\left(\frac{|v_n|}{|v_p|}\right) K F}{j P_{yn} \sqrt{M_n^2 + M_p^2} v_{np}}, \quad (3)$$

де N_n і N_p – потужність приводу подачі та різання, Вт; t – ширина ріжучої кромки, м; v – коефіцієнт Пуассона, в.о.; s – глибина руйнування породи, м; P_k – контактна міцність породи, Па; η_n – ККД двигуна, в.о.; K – кількість ріжучих кромки, шт., j – відстань між ріжучими кромками, м; P_{yn} – навантаження на робочий інструмент, Н; M_n – крутний момент приводу подачі, Н·м; M_p – крутний момент приводу різання, Н·м; v_{np} – швидкість потоку промивної рідини при бурінні, м/с.

Результати дослідження

За (2) з урахуванням (3) побудовано залежності ППЕ від швидкості різання породи $\gamma = f(V_p)$ (рис. 1) і швидкості подачі робочого інструмента $\gamma = f(V_n)$ (рис. 2) для мергелю, граніту та гнейсу.

Ці залежності є спадними функціями, що пояснюється кінетичною природою руйнування [21, 22]. Тобто при збільшенні швидкості різання зростає сила тертя, а відповідно, і температура гірської породи. На молекулярному рівні у цей час підвищується власна частота коливань. Це викликає локальні напруження, що можуть сягати значень, співрозмірних із межею

міцності зв'язків на розрив, або наблизитися до них. З аналізу залежностей (див. рис. 1) це відбувається за швидкості 8 м/с, коли тангенс кута дотичної до кривої зменшується на 40 %. Тобто відбувається зростання енергії активації процесу знеміцнення. За рахунок цього утворення одиниці площі нової поверхні проходить з меншими витратами енергії. Так, наприклад, з рис. 1 видно, що при збільшенні швидкості різання від 4 до 12 м/с ППЕ зменшується від 6 до 0,3 Дж/м² для гнейсу, від 0,69 до 0,03 Дж/м² для мергелю, від 0,41 до 0,02 Дж/м² для граніту.

На рис. 3 показана залежність ППЕ від потужності приводу $\gamma = f(N_n)$.

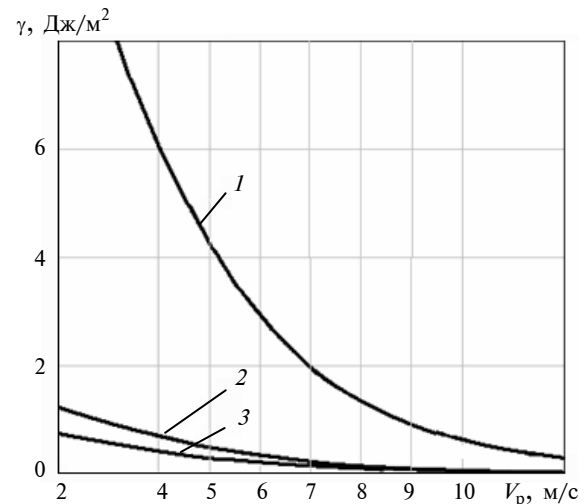


Рис. 1. Залежність питомої поверхневої енергії від швидкості різання породи $\gamma = f(V_p)$: 1 – гнейс, 2 – мергель, 3 – граніт

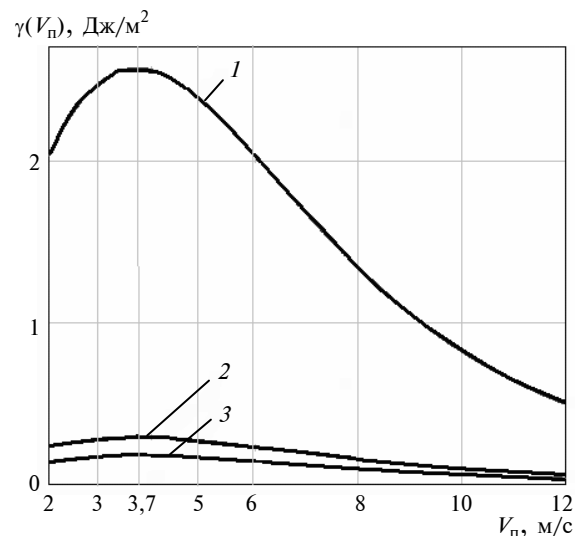


Рис. 2. Залежність питомої поверхневої енергії від швидкості подачі робочого інструмента $\gamma = f(V_n)$: 1 – гнейс; 2 – мергель, 3 – граніт

При руйнуванні гірської породи частина енергії приводу іде на формування ядра ущільнення. При цьому ППЕ накопичується як потенційна енергія в масиві. Тому залежність $\gamma = f(N_p)$ є висхідною функцією.

Залежність зміни ППЕ від відстані між ріжучими кромками робочого інструмента $\gamma = f(j)$ (рис. 4) також є спадною функцією. ППЕ зменшується від 0,8 до 0,5 Дж/м² при збільшенні відстані між ріжучими кромками робочого інструмента від 0,01 до 0,08 м. При подальшому збільшенні відстані між ріжучими кромками ППЕ залишається на рівні 0,03 Дж/м².

Наявність тріщин у породі визначається через параметр $l_{кр}$. У механіці руйнування довжина тріщини вважається критичною, якщо при її розвитку кількість виділеної пружної енергії більша кількості енергетичних витрат пластичної деформації [23].

Питома енергоємність руйнування E_p , кВт·год/м³, може бути виражена через фізико-механічні властивості гірничої породи і кри-

тичну довжину тріщини $l_{кр}$ для породного масиву, що руйнується:

$$E_p = \frac{2\gamma E}{\pi \sigma_T l_{кр}}. \quad (4)$$

З урахуванням (2), (3) і (4) побудовані математичні моделі, які дали змогу дослідити залежності енергоємності руйнування від питомої поверхневої енергії для руйнування гірських порід зі значенням ППЕ в межах 15–30 Дж/м² (пісковики і вапняки) та для порід зі значенням ППЕ в межах 30–70 Дж/м² (гнейси і граніти) (рис. 5).

Залежності мають зростаючий логарифмічний характер. Це зумовлено законом Ріттингера (1867 р.), згідно з яким питома поверхнева енергія пропорційна роботі утворення нових поверхонь матеріалу. Відповідно, зростання ППЕ викликає збільшення енергоємності руйнування [24–27].

Для проведення експериментальних досліджень зміни ППЕ гірських порід під дією магні-

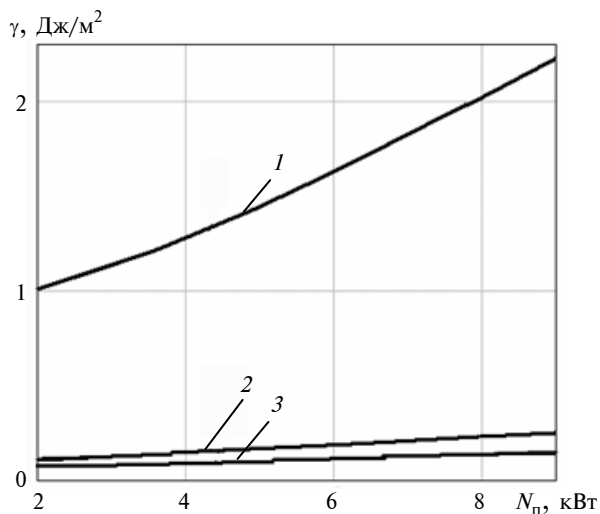


Рис. 3. Залежність питомої поверхневої енергії від потужності приводу подачі $\gamma = f(N_p)$: 1 – гнейс; 2 – мергель; 3 – граніт

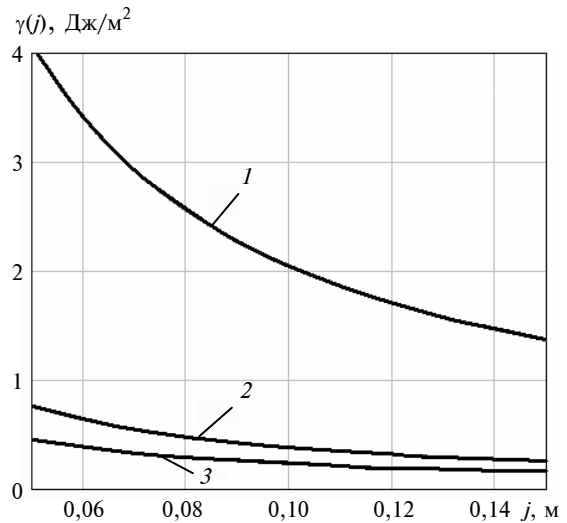


Рис. 4. Залежність питомої поверхневої енергії від відстані між ріжучими кромками робочого інструмента $\gamma = f(j)$: 1 – гнейс, 2 – мергель, 3 – граніт

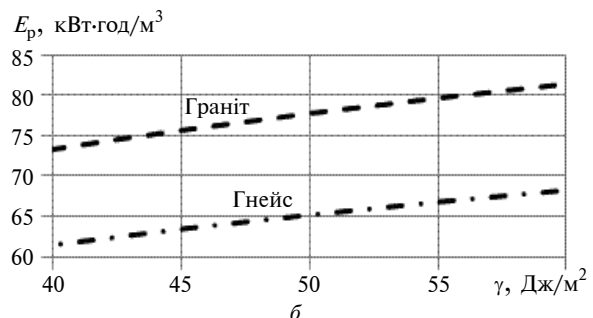
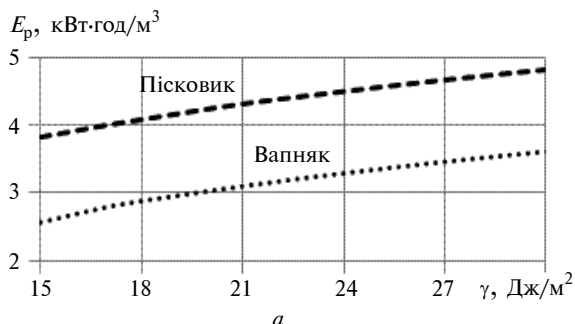


Рис. 5. Залежності енергоємності руйнування від питомої поверхневої енергії: а – пісковики і вапняки; б – гнейси і граніти

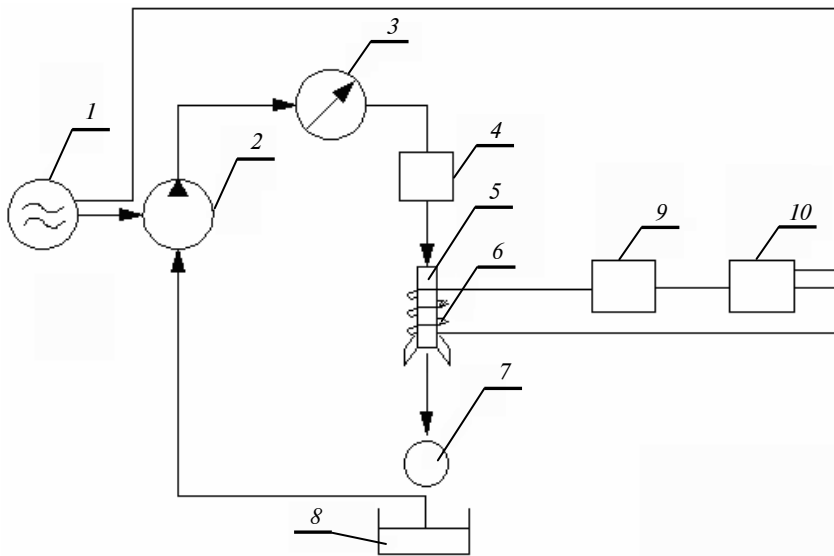


Рис. 6. Схема експериментального станда для досліджень зміни питомої поверхневої енергії гірських порід під дією магніто-гідрокавітаційного навантаження: 1 – електрична мережа змінного струму 220 В; 2 – відцентровий насос JEX 500; 3 – манометр ДМ 05063; 4 – муфта; 5 – кавітатор; 6 – обмотка індуктивності постійного струму; 7 – зразок гірської породи; 8 – резервуар; 9 – випрямляч ВСА-5К; 10 – блок резисторів ПЭВ-100

то-гідрокавітаційного навантаження створено стенд, схему якого зображено на рис. 6. Експериментальний стенд застосовується для вивчення зміни ППЕ при зміні параметрів, що визначають режим магніто-гідрокавітаційного навантаження: довжини дифузора та магнітної індукції у дифузорі кавітатора різця кавітаційного (патент UA № 101946, МПК E21B 7/18). Функціями системи є збільшення штучної та ініціювання зростання природної тріщинуватості вибою, зниження ППЕ для зменшення енергоємності руйнування гірських порід.

Схема працює таким чином. Промивна рідина відкачується за допомогою відцентрового самовсмоктувального насоса JEX 500 2 з резервуара 8. Тиск у системі подачі води вимірювався за допомогою манометра ДМ 05063 3. За допомогою муфти 4 на виході трубопроводу кріпиться кавітатор 5. Останній є вузлом різця кавітаційного, що забезпечує магніто-гідрокавітаційне навантаження гірської породи. Обмотка індуктивності постійного струму 6, яка розміщена на кавітаторі, слугує для створення постійного магнітного поля та забезпечує фокусування кавітаційних каверн. Для уникнення короткого замикання в ланцюзі 1–10–9–6 (див. рис. 6) та для забезпечення безперебійної роботи випрямляча використано блок резисторів ПЭВ-100 10, з'єднаних паралельно. На виході кавітатора 5 для магніто-гідрокавітаційної об-

робки розміщується зразок гірської породи 7.

Зображення різця кавітаційного, запропонованого до промислового виробництва, наведено на рис. 7, 8.

Різець кавітаційний приєднується до бурової штанги 1 за допомогою конічної замкової різьби. Між різцем та буровою штангою виконано зазор для зниження концентрації навантаження на різьбу. У зазор поміщено прокладку гумову 2. Функція останньої – запобігати зростанню тиску між буровою штангою та підвідним каналом 3. Кожух 4 застосовується для фіксації положення магнітів 5 і захисту їх від механічних пошкоджень. Магніти 5 слугують для забезпечення фокусування ка-

вітаційних бульбашок. У насадці дифузорній 6 виникає кавітаційний режим потоку завдяки її геометричним особливостям. Вона кріпиться за допомогою конічної різьби та має пази монтажні 7 під ключ спеціального виконання. За необхідності зміни довжини дифузора дифузорна насадка замінюється. Основною ріжучою частиною різця є твердосплавні вставки 8.

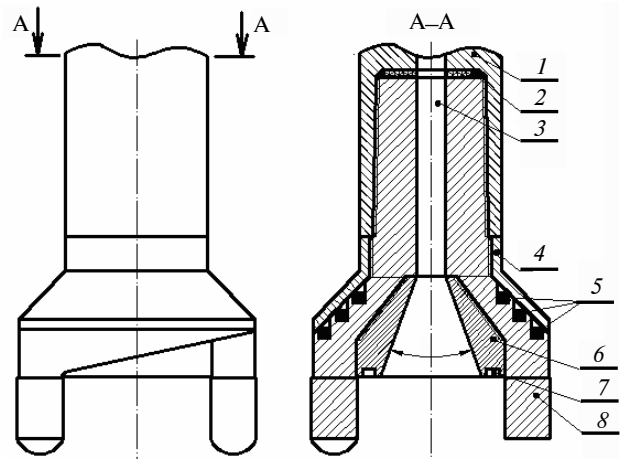


Рис. 7. Різець кавітаційний із фрагментом бурової штанги: 1 – фрагмент бурової штанги; 2 – прокладка гумова; 3 – канал підвідний; 4 – кожух; 5 – магніт; 6 – насадка дифузорна; 7 – паз монтажний; 8 – вставка твердосплавна



Рис. 8. Різець кавітаційний: 1 – корпус; 2 – магніти; 3 – кожух; 4 – ріжучі кромки; 5 – дифузор кавітатора; 6 – промивний канал; 7 – твердосплавні вставки

Висновки

Перевагою обертового магніто-гідрокавітаційного руйнування гірських порід є те, що немає потреби у додаткових витратах на модернізацію обладнання та зміну технологічних умов. До категорії витрат, що збільшились, відносяться лише витрати на виготовлення різця кавітаційного.

Використанням магніто-гідрокавітаційного навантаження при реалізації обертового магніто-гідрокавітаційного руйнування гірських порід на кварцитовому кар'єрі Товкачівсько-гірничо-збагачувального комбінату знижено енергоємність руйнування кварцитів з 95,0 до 87,5 кВт·год/м³ (7,9 %) та фінансові витрати на електроенергію зі 113,05 до 103,53 грн/м³ (8,4 %) за магнітної індукції магнітів різця кавітаційного 15 мТл. Річний економічний ефект від впровадження становить 27000 грн. Строк окупності 2 місяці.

Технологічні процеси гірничого виробництва є найбільш енергоємними, а результати дослідження та отримані залежності надають можливість зменшення енергоємних затрат.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на удосконалення нового математичного апарату комбінованого обертового магніто-гідродинамічного руйнування гірських порід. Його практична апробація дає змогу врахувати технологічні та фізико-механічні показники руйнування гірських порід на функціональному, а не емпіричному рівні. Сукупність теоретичних пошуків і експериментальна їх перевірка забезпечать триразове збільшення швидкості різання при чотириразовому зменшенні питомої поверхневої енергії. Зниження енергоємності руйнування гірських порід буде досягнуто за рахунок сукупної дії внесеної штучної тріщинуватості вибою додатково до існуючої природної його тріщинуватості.

References

- [1] A.A. Griffith, "The phenomena of rupture and flow in solids", *Philosoph. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A*, vol. 221, pp. 163–198, 1921.
- [2] S.N. Zhurkov *et al.*, "On the prediction of rock destruction", *Izv. AN SSSR, Ser. Fizika Zemli*, no. 6, pp. 2–7, 1977.
- [3] I.V. Obreimov and Ie.S. Terekhov, "On the strength of mica for breaking along the cleavage plane", in *Studies on Experimental and Theoretical Physics (in Memory of O. Landsberg)*. Moscow, SU: AN SSSR Publ., 1959, pp. 36–84
- [4] A.A. Griffith, "The phenomena of rupture and flow in solids", *Phil. Trans. Roy. Soc.*, vol. A221, pp. 49–163, 1920.
- [5] C. Zener, *Fracturing in Metals*. Cleveland: ASM, 1998.
- [6] A.N. Stroh, *Advances in Physics*, vol. 6. New York: AIME, 1997, pp. 214–382.
- [7] A.H. Cottrell, *Structural Processes in Greep*. London, UK: Iron and Steel Inst, 1991.
- [8] J.J. Gilman, *Physics Process Transports*, vol. 212. New York: AIME, 1988, pp. 364–487.
- [9] E. Orován, *Dislocations in Metals*. New York: AIME, 1994, pp. 23–51.
- [10] N.J. Petch, *Iron and Steel Institute. Iron-Carbon Complexes*. London: PSF, 1993, pp. 45–184.
- [11] G.G. Karkashadze, *Mechanical Destruction of Rocks*. Moscow, Russia: Moscow State Mining University Publ., 2004.
- [12] A.I. Bondarets *et al.*, "Ultrasonic intensification of rock destruction", *Naukovi Praci DonNTU*, no. 18, pp. 131–137, 2010.
- [13] I.N. Ermolov and Yu. A. Ostanin, *Methods and Means of Nondestructive Testing*. Moscow, SU: Higher School, 1988.
- [14] T.T. Garipov, "Modeling of the hydraulic fracturing process in a poroelastic medium", *Matematicheskoye Modelirovaniye*, vol. 18, no. 6, pp. 53–69, 2006.
- [15] J.J. Gilliman, "Dislocation dynamics and the response of material to impact", *Appl. Mech. Rev.*, vol. 21, no. 8, pp. 767–783, 1968.
- [16] B.M. Smirnov, "Scaling in atomic and molecular physics", *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, vol. 171, no. 12, pp. 1291–1315, 2001.
- [17] I.N. Stranskiy and R. Kaishev, "To the theory of crystal growth and the formation of crystalline embryos", *Uspekhi Fizicheskikh Hnauk*, vol. 21, no. 4, pp. 408–465, 1939.
- [18] M.E. Bobrova and A.S. Perezhogin, "Modeling of the field of deformations and zones of dilation in an elastic half-space with a combination of double forces", *Vestnik KRAUNC, Fiz.-Mat. Nauki*, no. 1, pp. 31–36, 2011.
- [19] M.P. Shaskolskaya, *Crystallography*. Moscow, SU: Higher School, 1984, pp. 248–274,
- [20] O.M. Terentiev, "Taking into account the strength of molecular bonds of rocks in the choice of working bodies for its destruction", *Visnyk NTUU KPI. Ser. Ghirmyctvo*, no. 19, pp. 154–161, 2010.
- [21] V.R. Regel *et al.*, "The kinetic nature of the strength of solids", *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, vol. 106, no. 2, pp. 193–228, 1972.
- [22] A.F. Ioffe *et al.*, "Deformation and strength of crystals", *Zhurnal Russkogo Fiziko-Khimicheskogo Obshchestva*, no. 22, pp. 286–293, 1924.
- [23] O.M. Terentiev, "Mechanism of creating the prefracture zone of rock formations with magnetic and hydrocavitation load", *Metallurgical and Mining Industry*, no. 4, pp. 353–355, 2015.
- [24] O.M. Terentiev, "Physical and technical bases of mining of minerals with energy-saving destruction of molecular bonds of rocks", Dr.Sci. dissertation, Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine, 2008.
- [25] O.M. Terentiev and A.Y. Kleshchov, "Synthesis of the conditions for the choice of energy-saving technology of destruction", in *Proc. Int. Conf. "Sustainable Energy Development: Current Trends, Technologies and Solutions-2014"*, Kyiv, Ukraine, 2014, pp. 51–52.
- [26] O.M. Terentiev and P.A. Gontar, "Reducing energy intensity of rock destruction under the influence of combined loads", in *Proc. All-Ukrainian Sci. Tech. Conf. "Innovative Technologies for the Development of Mineral Deposit"*, Donetsk, Ukraine, 2013, pp. 109–113.
- [27] Yu.I. Voitenko and A.M. Shukurov, "On energy intensity of rock destruction and ways of its reduction", *Visnyk NTUU KPI. Ser. Ghirmyctvo*, no. 31, pp. 11–25, 2016.

А.Ф. Кичигин, О.М. Терентьев, В.Е. Полищук

МЕХАТРОННАЯ СИСТЕМА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Проблематика. Рассмотрена возможность снижения энергоемкости разрушения горных пород за счет совокупности внешней искусственной трещиноватости забоя дополнительно к существующей природной его трещиноватости. Исследование выполнялось в соответствии с "Общегосударственной программой развития минерально-сырьевой базы Украины на период до 2030 года" (Закон Украины от 21 апреля 2011 № 3268-VI).

Цель исследования. Снижение энергоемкости разрушения горных пород энергосберегающими мехатронными системами.

Методика реализации. Использованы: метод индукции для определения общих недостатков существующих теорий разрушения горных пород; метод Джордано–Гаусса позволил определить доминантные условия разрушения кристаллических структур известняков, гнейсов, мергелей, песчаников, гранитов; метод синтеза позволил выделить энергетический критерий в системе разрушения внешним энергетическим потоком; метод теоретического моделирования позволил определить зависимости модуля упругости I рода и удельной энергоёмкости от технологических параметров, энергетического потока и параметров кристаллических структур горных пород; экспериментальный метод позволил подтвердить аналитические зависимости модуля упругости I рода и удельной энергоёмкости от параметров внешнего энергетического потока и параметров кристаллических структур породного массива.

Результаты исследования. Установлено, что основными параметрами, которые влияют на процесс разрушения твёрдого тела, являются характеристики и удельная поверхностная энергия. Экспериментальная проверка предложенной модели показала, что при увеличении скорости резания от 4 до 12 м/с удельная поверхностная энергия уменьшается от 6 до 0,3 Дж/м² для гнейса, от 0,69 до 0,03 Дж/м² для мергеля, от 0,41 до 0,02 Дж/м² для гранита. При увеличении расстояния между режущими кромками рабочего инструмента от 0,01 до 0,08 м удельная поверхностная энергия уменьшилась от 0,8 до 0,5 Дж/м².

Выводы. Создана мехатронная система вращательного магнитно-гидрокавитационного бурения горных пород. Она прошла промышленные испытания на кварцевом карьере Товкачевского горно-обогатительного комбината. Снижены энергоёмкость разрушения кварцитов с 95,0 до 87,5 кВт·ч/м³ (8 %). Годовой экономический эффект от внедрения составляет 27 000 грн. Срок окупаемости 2 месяца.

Ключевые слова: энергоёмкость разрушения горных пород; внесённая трещиноватость; удельная поверхностная энергия разрушения; магнито-гидрокавитационное нагружение; вращательное магнито-гидрокавитационное бурение горных пород.

A.P. Kichigin, O.M. Terentiev, V.O. Polishchuk

THE MECHATRONIC SYSTEM OF ENERGY SAVING ROCK DESTRUCTION

Background. The article considers the possibility of reducing the energy intensity of rock destruction due to the combined artificial fracturing of the face in addition to the existing natural fracture. The study was carried out in accordance with the "National program for the development of the mineral resource base of Ukraine for the period until 2030" (Law of Ukraine of April 21, 2011 No. 3268-VI).

Objective. The aim of the paper is the energy intensity reduction of rock destruction by energy-saving mechatronic systems.

Methods. The following methods were used: the induction method that determined the general shortcomings of existing theories of rock destruction; the method of Giordano-Gauss made it possible to determine the dominant conditions for the destruction of crystalline structures of limestones, gneisses, marls, sandstones, granites; the method of synthesis made it possible to distinguish the energy criterion in a system of destruction by an external energy flow; the method of theoretical modeling made it possible to determine the dependences of the modulus of elasticity of the first kind and the specific energy intensity on technological parameters, the energy flow, and the parameters of the crystalline rock structures; the experimental method has made it possible to confirm the analytical dependences of the elastic modulus of the first kind and the specific energy intensity on the parameters of the external energy flow and the parameters of the crystal structures of the rock massif.

Results. It is established that the main parameters that affect the process of solid body destruction are characteristics and specific surface energy. An experimental verification of the proposed model showed that when the cutting speed is increased from 4 to 12 m/s, the specific surface energy decreases from 6 to 0.3 J/m² for gneiss, from 0.69 to 0.03 J/m² for marl, from 0.41 to 0.02 J/m² for granite. With the increase in the distance between the cutting edges of the working tool from 0.01 to 0.08 m, the specific surface energy decreased from 0.8 to 0.5 J/m².

Conclusions. A mechatronic system of rotational magnetic-hydrocavitation rock drilling has been created. The system passed industrial tests on the quartz mine of the Tokavachevsky ore mining and processing enterprise. The energy intensity of quartzite destruction has been reduced from 95.0 to 87.5 kWh/m³ (8%), the annual economic effect from the introduction is 27000 UAH. Payback period is 2 months.

Keywords: energy intensity of rock destruction; cracking; specific surface energy of destruction; magnetic-hydrocavitation load; rotary-magneto-hydrocavitational rock drilling.

Рекомендована Радою
Институту енергозбереження
та енергоменеджменту
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
20 березня 2018 року

Прийнята до публікації
6 вересня 2018 року