

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЄМНОСТІ РУЙНУВАННЯ ВУГЛЕПОРОДНОГО МАСИВУ

Мета. Дослідження фізико-механічних характеристик та енергоємності руйнування порід вуглепородного масиву динамічними навантаженнями з урахуванням спрямованої зміни їх властивостей.

Методика. Для вивчення та оцінки енергоємності руйнування анізотропних гірських порід при динамічних навантаженнях проведені експериментальні дослідження в лабораторних умовах. Спосіб полягає у дослідженні впливу поверхнево-активних речовин (ПАР) на енергоємність руйнування вуглепородного масиву, визначення фізико-механічних характеристик і деформацій порід. Відібрані зразки були насичені ПАР. Після руйнування зразків динамічними навантаженнями за допомогою методу оптичної мікроскопії оцінювали характер руйнування породи за гранулометричними характеристиками. Енергоємність руйнування визначали за величиною роботи, витраченої на утворення нової поверхні частинок продуктів руйнування породи.

Результати. Аналіз гранулометричних та енергетичних характеристик зразків порід вуглепородної товщі, показав, що при збільшенні лужності розчинів ПАР спостерігається зменшення питомої енергії руйнування вибуховими навантаженнями кварцових порід. Особливо помітно вплив ПАР на характер руйнування вапняку. При дії вибухових навантажень питома енергія руйнування при насиченні цієї породи кальцинованою содою зменшується. Насичення вугілля різного ступеня вуглефікації практично не впливає на енергоємність їх руйнування при дії ударних та вибухових навантажень.

Наукова новизна. Розроблено спосіб оцінки енергоємності руйнування анізотропних гірських порід при динамічних навантаженнях з урахуванням спрямованої зміни їх властивостей під дією ПАР. Пріоритет методу захищений патентом України.

Практична значимість. Використання ПАР дозволяє зменшувати питому енергію руйнування при впливі на породу динамічних навантажень, що створює основу розробки нових енергозберігаючих способів дроблення вуглепородного масиву.

Ключові слова: вуглепородний масив, вибухове руйнування, поверхнево-активні речовини, гранулометрія, дисперсність.

Вступ.

Руйнування гірських порід та інших твердих середовищ механічними чи динамічними навантаженнями, тобто дроблення та подрібнення матеріалів, знаходить широке застосування у різних галузях промисловості та становить основу багатьох технологічних процесів. Зокрема, при бурінні свердловин, дробленні гірських порід на стадії їх відокремлення від гірського масиву та подальшої переробки з утворенням частинок з великим спектром крупності.

Одним із основних показників оцінки якості вибуху є ступінь дроблення гірських порід, що залежить від багатьох факторів. Визначальними факторами в процесі руйнування є енергія, що передається твердому середовищу, а також його енергетичні характеристики. Дроблення твердих тіл і гірських порід залежить від таких енергетичних характеристик, як енергоємність руйнування при механічному та динамічному навантаженні, коефіцієнт корисного використання енергії вибуху та коефіцієнт подрібнення. Тому роботи

проведене експериментальне дослідження у лабораторних умовах руйнації порід, складових вуглепородного масиву, для оцінки енергоємності руйнування при динамічних навантаженнях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Оцінка чистоти рудникової атмосфери в вугільних шахтах після вибухових робіт здійснюється за гранично допустимими концентраціями (ГДК), тобто за такими концентраціями шкідливих домішок, які ще не надають негативної дії на людину, не знижують його працездатності. У комплексі з пилом, який утворюється при буропідривних роботах, забруднена атмосфера є серйозною небезпекою загального отруєння організму і сприяє захворюванню гірників на пневмоконіоз. Це пояснюється тим, що пил є досить активним сорбентом, отруйні гази десорбцірують з нього тривалий час і комплексно впливають на живий організм [1,2].

Найбільш шкідливим компонентом вугільно-породного пилу є вільний і

пов'язаний двоокис кремнію. Проведеними Макіївським науково-дослідним інститутом дослідженнями вмісту двоокису кремнію в пилу шахт Донбасу встановлено, що середній відносний вміст загального двоокису кремнію в вугільно-породному пилу становить 38-47%, а вміст вільного двоокису кремнію – 3,0-5,5%. Патогенна дія визначається головним чином його масою, речовим складом і дисперсністю [3].

Наслідком вибуху є утворення великої кількості дрібнодисперсного пилу. Запиленість 1 м^3 повітря протягом 15-20хв після вибуху, якщо не застосовувати засобів знепилювання, становить 400-1000 мг, при цьому до 90-97% частинок цього пилу мають діаметр менше 5 мкм. Такий пил важко пригнічується і є найбільш небезпечним для людини. Адсорбція на його поверхні отруйних газів підвищує агресивність цього пилу і сприяє швидкому розвитку у працюючих в шахтах профзахворювань, в тому числі пов'язаних з органами дихання – пневмоконіозу, хронічного пилового бронхіту та інших захворювань [4].

Технологічні процеси, пов'язані з буропідривними роботами для міцних гірських порід пов'язані з суттєвим збільшенням енергоємності руйнування. Перспективним способом зміни механізму руйнування на мікрорівні, коли новоутворені поверхні формуються за контактами зерен порід, є використання поверхнево-активних речовин (ПАР).

У роботах [5-9] наведено результати досліджень по руйнуванню гірських порід, насичених різними видами ПАР. Зокрема, детально описана кінетика насичення породного масиву поверхнево-активними речовинами, дія яких заснована на адсорбційному зниженні поверхневої енергії, що полегшує розвиток тріщин. Показано, також, що насичення порід активними розчинами, визначається величиною і характером пористості порід, їх початковою вологістю, типом розчину ПАР, напруженим станом масиву та ін. Крім того, досліджено можливість спрямованої зміни властивостей гірської породи, яка руйнується вибухом, шляхом насичення середовища поверхнево-активною речовиною – розчином SARMA, хімічний склад якої не надано. Внаслідок зменшення поверхневої енергії на контактах мінеральних зерен під дією ПАР знижується

міцність гірських порід і збільшується ефективність їх дроблення енергією вибуху. Використання лужних розчинів в якості ПАР дозволяє зменшити міцність гірських порід, які вміщують кварц і змінити механізм їх руйнування вибухом.

Мета статті (постановка завдання).

Метою роботи є дослідити фізико-механічні характеристики та енергоємності руйнування порід вуглепородного масиву динамічними навантаженнями з урахуванням спрямованої зміни їх властивостей.

Завдання роботи: виконати аналіз гранулометричних та енергетичних характеристик зразків порід вуглепородної товщі; розробити спосіб оцінки енергоємності руйнування анізотропних гірських порід при динамічних навантаженнях з урахуванням спрямованої зміни їх властивостей під дією ПАР.

Методи дослідження.

Дослідження проводилися використовуючи наступні методи: відбір зразків породи у реальних умовах шахт; експериментальні дослідження у лабораторних умовах руйнування порід вуглепородного масиву вільним ударом та вибухом; статистична обробка результатів; обробка результатів аналітичними методами.

Виклад основного матеріалу.

Для вивчення та оцінки енергоємності руйнування анізотропних гірських порід при динамічних навантаженнях з урахуванням спрямованої зміни їх властивостей було розроблено спосіб оцінки таких змін у лабораторних умовах. Пріоритет методу захищений патентом України [10].

Відповідно до запропонованого способу, спочатку на блоці гірських порід, підготовленому до розробки, або в місцях проходки гірничих виробок бурят свердловини геологорозвідувальні, здійснюють відбір орієнтованих кернів або штафів гірських порід. Потім у лабораторних умовах на каменерізній машині алмазним диском формують еталонні зрізи для виготовлення шліфів для руйнування на копрі ударом вантажу, що вільно падає, а інших – вибухом заряду вибухової речовини (ВР).

Після цього в частині моделей гірського масиву, попередньо встановивши їх у кондуктор для центрування, у торці керна в центрі бурять вибухові порожнини на глибину 2/3 товщини моделей. Після насичення моделей поверхнево-активними речовинами (ПАР) та розміщення у вибуховій порожнині зарядів високобризантної ВР їх встановлюють у спеціальний бокс – вибухову камеру. У простір між внутрішньою стінкою камери і поверхнею моделей розміщують демпфуючу прокладку (зазвичай вакуумну гуму) і підривають. Далі зруйновані моделі (зразки гірських порід) виймають із камери та шляхом розсіювання на лабораторних ситах

відокремлюють від зруйнованої частини моделей дрібні фракції (0-100 мкм). Потім за допомогою методу оптичної мікроскопії оцінюють характер руйнування породи за гранулометричними характеристиками, а енергоємність руйнування визначають за величиною роботи, витраченою на утворення нової поверхні частинок продуктів руйнування породи.

Для досліджень фізико-механічних характеристик та енергоємності руйнування порід вуглепородного масиву було відібрано зразки у формі куба з розміром ребра 350 мм та керна діаметром 55-57 мм. Опис зразків наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Відомості про зразки порід, відібраних для досліджень фізико-механічних властивостей та енергоємності руйнування

№ п/п	Тип породи	Місце відбору проб	Характеристика породи
1	Пісковик середнє- та дрібнозернистий	ш. Дніпровська «ДТЕК-Павлоградвугілля», 110У сб. штрек, кривля пласта С ₁₀	Пісковик світло-сірий, середнезернистий, міцний
2		ш. Сташкова «ДТЕК-Павлоградвугілля», 519 сб штрек, кривля пласта С ₅ ^В	Пісковик сірий дрібнозернистий, горизонтально-шаруватий, міцний
3		ш. Благодатна «ДГЕК-Павлоградвугілля», 2-й зап. маг. отк. штр, кривля пласта С ₅ гор. 250м	Пісковик світло-сірий, крупнозернистий, переривчасто-шаруватий, міцний
4	Пісковик крупнозернистий	ш. Скочинського «ПрАО Донвугілля», гор.1200 м, скв. 11495	Пісковик сірий, крупнозернистий, горизонтально-шаруватий, міцний
5	Вапняк	ПрАТ ДФДК, Центральний кар'єр, гор. -80м	Вапняк перевідкладений, дрібнозернистий, темно- та світло-сірий зливний незначно доломітизований
6	Вугілля	ш. Терновська «ДТЕК-Павлоградвугілля», 576 борт, штрек, пласт С ₅ , гор. 245м	Вугілля горизонтально-шарувате (шари вітрена, фюзена, кларена та дюрена)
7		ш. Свердлова ПрАО «ДТЕК-Свердловантрацит», пл. к ₅ ¹ конвеєрний штрек, гор. 1115м	Вугілля горизонтально-шарувате (шари вітрена, фюзена, кларена та дюрена)

Для детального аналізу та отримання характеристик міцності вміщуючих порід і вугілля вуглепородного масиву, таких як щільність, межа міцності на одновісне стиснення, швидкість поздовжніх і поперечних хвиль, коефіцієнт Пуассона і модуль Юнга, з відібраних проб і кернів виготовляли моделі для проведення їх випробувань згідно з ДСТУ [11, 12]. Для кожної серії випробувань було виготовлено 10 моделей кубічної форми розміром ребра

40±3 мм. Грані зразків оброблялися шліфувальним порошком, при цьому їхня кривизна не перевищувала 0,05 мм. Контроль торцевих поверхонь (граней) зразків здійснювали індикатором по двох взаємно перпендикулярних гранях. Відхилення граней від паралельності становило ±0,1 мм.

Підготовлені таким чином зразки піддавалися випробуванням на одновісне стиснення на гідравлічному пресі ПР-500

[13]. Контроль тиску виконували манометром, а замір поперечної деформації – тензодатчиками переміщення.

Дослідження акустичних властивостей гірських порід – швидкості поширення поздовжніх та поперечних хвиль – проводилося на стенді, розробленому в ІДТМ НАН України. До складу стенду входить переносний імпульсний ультразвуковий прилад УК-10ПМ з п'єзоперетворювачами поршневого типу в захисному кожусі з аксіально-поляризованої кераміки ЦТС.

Підготовлений зразки порід встановлювали між п'єзоперетворювачами і при стійкій картинці коливальних на екрані приладу вимірювали швидкість поширення пружних хвиль, як в ручному, так і в автоматичному режимі з індикацією на екрані осцилографа. Обробка результатів випробувань проводилася апробованим методом визначення швидкості поширення поздовжніх та поперечних хвиль [14].

Модуль Юнга за виміряними значеннями швидкостей поширення пружних хвиль у зразку гірської породи визначали за формулою:

$$E = \rho V_p^2, \quad (1)$$

де ρ – щільність суміші; V_p – швидкість поздовжньої хвилі.

Для прискорення та спрощення процесу визначення пружних параметрів зразків порід використовувалися номограми В. Рентча та Г. Кромфолза, що дозволяють оперативно визначити коефіцієнт Пуассона по відношенню V_p/V_s [15]. Середні значення кожної серії випробувань акустичних і фізико-механічних характеристик гірських порід наведені в табл. 2.

Отже, енергоємність руйнування можна представити у вигляді величини роботи, витраченої на утворення одиниці новоутвореної поверхні, яка визначається за формулою:

$$q_y = \frac{A_p}{S_H}, \quad (2)$$

де q_y – питома енергоємність руйнування, Дж/см²; A_p – робота, витрачена на дроблення, Дж; S_H – зновустворена поверхня, см²;

Ця величина є характеристикою середовища, що оцінюється при однакових параметрах навантаження і розмірів зразків, що випробовуються. Однак питома енергоємність руйнування не завжди є показовою при вибухових навантаженнях внаслідок особливостей дії вибуху в середовищі.

При вибуху порода, що безпосередньо примикає до заряду ВР, на короткий проміжок часу сильно стискається. У тій зоні внаслідок великих пластичних деформацій поглинається значна кількість енергії, що знижує можливість трансформації енергії у дальні зони. Це зрештою призводить до зниження інтенсивності дроблення. Величина зони зминання залежить не тільки від властивостей міцності матеріалу, але і від пружних властивостей.

Тому, поруч із питомою енергоємністю руйнації гірських порід необхідно враховувати коефіцієнт корисного використання енергії вибуху, тобто відношення енергії, що йде на дроблення, до загальної енергії ВР.

Отже, коефіцієнт корисного використання енергії вибуху ВР залежить від ряду факторів, що ускладнює його теоретичне визначення. Експериментально він може бути розрахований як відношення питомої енергоємності руйнування цієї породи до величини енергоємності руйнування під час вибуху для конкретних умов та параметрів підричних робіт. Дана величина являє собою кількість енергії ВР, що витрачається на одиницю площі новоствореної поверхні:

$$q_v = \frac{E_{ВВ}}{S'_H}, \quad (3)$$

де q_v – енергоємність руйнування під час вибуху, Дж/см²; $E_{ВВ} = Q\gamma$, Q – теплота вибуху, кДж/кг; γ – маса заряду ВР, кг; S'_H – зновустворена поверхня при вибуху, см².

Таблиця 2. Експериментальні та розрахункові значення акустичних і фізико-механічних характеристик порід, що випробовуються.

№, п/п	Тип гірської породи	Коефіцієнт міцності, f	Щільність зразків, $\rho \cdot 10^3$ кг/м ³	Швидкість поздовжньої хвилі, V_p , м/с	Швидкість поперечної хвилі, V_s , м/с	V_p/V_s	Коефіцієнт Пуассона, ν	Модуль Юнга, E , МПа
1	Пісковик, ш. Дніпровска	12-15	2,95	6400	3800	0,59	0,23	18,9
2	Пісковик, ш. Сташкова	10-13	2,3	5300	3500	0,66	0,11	12,1
3	Пісковик, ш. Благодатна	4-5	2,10	4800	3300	0,68	0,07	10,0
4	Пісковик, ш. Скочинського	8-10	2,8	6300	3600	0,57	0,25	17,6
5	Вапняк ПрАО ДФДК	10-12	3,0	5500	2750	0,50	0,22	7,0
6	Вугілля, пл. C_5^B ш. Терновска	3-4	1,24	1450	725	0,50	0,25	4,2
7	Вугілля – антрацит, пл. k_5^1 , ш. Свердлова	1-2	1,8-2,0	1145	573	0,50	0,14	3,6

Тоді коефіцієнт корисного використання енергії вибуху визначається з виразу:

$$\eta_B = \frac{q_y}{q_B}, \quad (4)$$

Величину питомої енергоємності руйнування оцінювали за відомими методиками [16].

Для проведення експериментальних досліджень у лабораторних та полігонних умовах на моделях була розроблена методика, що дозволяє оцінити характер і енергоємність руйнування твердих середовищ при вільно падаючому вантажі та під час вибуху. При цьому використовувалися як сухі зразки, так і зі зміненими властивостями міцності під впливом різних розчинів – поверхнево-активних речовин.

Відповідно до методики досліджень відібрані поза зоною впливу динамічних (вибухових) навантажень зразки гірських порід (геологорозвідувальні керни діаметром 43-75 мм) в лабораторних умовах на каменерізній машині розпилювали на моделі кубічної форми з розміром ребра 40 ± 2 мм і моделі циліндричної форми

заввишки діаметру керна. Для визначення енергоємності руйнування під час вибуху в підготовлених моделях у центрі однієї з граней алмазним свердлом свердлили вибухову порожнину на $2/3$ її висоти діаметром 4-5 мм.

У роботі [17] наводяться дані про те, що міцність гірських порід, що руйнуються, може бути істотно знижена шляхом їх обробки ПАР. У зв'язку з цим, відібрані для досліджень зразки гірських порід (моделі) насичувалися нами поверхнево-активними речовинами (ПАР). Оскільки переважна більшість гірських порід різного генезу у своєму складі містить кварц (у тій чи іншій кількості), часто виконує роль своєрідного «цементу», міцність якого різко знижується при дії розчинів, які мають лужну реакцію.

Експериментальні зразки витримували в 10% розчинах Na_2CO_3 і $NaHCO_3$, а також омагніченій воді і вапняному молоці. Контрольні та експериментальні зразки з вихідною вологістю зважували, потім висушували в сушильній шафі протягом доби і знову зважували. За отриманими даними визначали їхню природну вологість, яка не повинна перевищувати 8-12 %. Далі зразки насичували розчинами ПАР протягом 24 годин і перед експериментами знову

зважували і визначали їх вологість після насичення за формулою:

$$W = \frac{g_1 - g_2}{g_2} \cdot 100\%, \quad (5)$$

де g_1 та g_2 – маса зразка гірської породи відповідно до і після сушіння, г.

Підготовлені зразки (контрольні та експериментальні) руйнували на вертикальному ударному копрі, що вільно падав з висоти 1 м. Крім того, у полігонних умовах зразки руйнували динамічним навантаженням високої інтенсивності (вибухова руйнація моделей).

Енергоємність руйнування гірських порід вибухом оцінювалося за результатами дроблення зразків високобризантним ВР. Зразок породи розміщували у вибуховій камері, внутрішня поверхня якої футерована гумовою прокладкою для зменшення вторинного дроблення, і дистанційно підривали вибуховим конденсаторним приладом [18-20].

Маса заряду ВР у всіх серіях експериментів становила 0,150 г, питома витрата ВР – 0,042 кг/м³. Як набійки використовувався кварцовий пісок фракції 0,25 мм.

Після кожної серії експериментів проводилося дослідження гранулометричного складу зруйнованих моделей методом ситового аналізу за методикою, викладеною в роботі [10] із застосуванням набору лабораторних сит. Зруйнований матеріал моделі поміщали на верхнє сито, весь набір струшували протягом 10 хвилин. Залишок на кожному ситі зважували на технічних терезах з точністю до 0,1%. Сума всіх отриманих класів крупності має більше ніж 1 % розходитися з масою вихідної моделі. Сума всіх класів крупності приймалася за 100%. Вихід класів отримували розподілом маси кожного класу на вихідну масу моделі.

При обробці гранулометричного складу зруйнованої моделі подрібнений матеріал аналізувався за такими основними показниками: характер руйнування моделі в цілому, визначення загальної маси моделі зруйнованої вибухом і вантажем, що вільно падає, вміст дрібних фракцій, вміст великих фракцій, діаметр середнього шматка і знову утвореної поверхні. Діаметр середнього шматка визначали за такою формулою:

$$d_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} w_i d_i}{100}, \quad (6)$$

де – w_i – вміст i -ї фракції або i -го шматка, %; d_i – середній розмір i -го шматка або i -ї фракції, см.

А сумарну новостворену поверхню визначали за формулою:

$$S_H = \frac{6}{\rho} \left[\frac{m_1}{d_{1cp}} + \frac{m_2}{d_{2cp}} + \frac{m_3}{d_{3cp}} + \dots + \dots + \frac{m_n}{d_{nmd}} \right] - S_0, \quad (7)$$

де S_H – площа новоутвореної поверхні, см²; d_{nmd} – середній розмір i -ї фракції, см; m_i – маса i -ї фракції, г; S_0 – початкова поверхня зразка моделі, см².

За розрахованими значеннями знову утвореної поверхні зруйнованих зразків визначали питому енергоємність руйнування при вільно падаючого вантажі і енергоємність руйнування моделей при вибуху за формулами (2) і (3). Знаючи питому енергоємність руйнування q_y та енергоємність руйнування при вибуху q_e розрахуємо коефіцієнт корисного використання енергії вибуху за формулою (3), а показник, що характеризує ступінь роздробленості зразка гірської породи із співвідношення:

$$K_\partial = \frac{S_0}{S_H}, \quad (8)$$

де K_∂ – коефіцієнт роздробленості зразка гірської породи; S_0 – початкова площа поверхні зразка, см²; S_H – новостворена площа поверхні після вибуху, см².

Обговорення результатів.

Результати експериментальних досліджень з оцінки подрібнення та їх взаємозв'язки з енергоємністю та іншими фізико-механічними властивостями наведені у табл. 3.

Аналіз наведених даних показує, що немає чіткої кореляції дрібності з пружними характеристиками середовища. Це є непрямим підтвердженням, що непружна фаза визначає процес руйнування. Однак, як випливає з результатів досліджень, акустична жорсткість не може характеризувати подрібнення гірських порід.

Таблиця 3. Гранулометричні та енергетичні характеристики зруйнованих зразків гірських порід різного генезису динамічними навантаженнями з цілеспрямованою зміною їх властивостей

Тип породи	Тип ПАР	d_{cp}	S_0	S_H	q_V	q_B	η_e	K_d	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Пісковик, ш. Сташкова «ДТЕК-Павлоградвугілля»	Вантаж, що вільно падає (ударний копер)								
	Не насичений ПАР	8,22	104,16	107,31	1,95	-	-	0,97	
	Омагнічена вода	8,30	109,00	214,90	0,97			0,50	
	Вапняне молоко	8,70	100,9	76,60	2,74			1,30	
	NaHCO ₃	8,18	92,80	175,90	1,19			0,52	
	Na ₂ CO ₃	8,73	100,90	84,40	2,50			1,20	
	Вибух								
	Не насичений ПАР	5,20	96,00	217,40	-	3,88	0,50	0,44	
	Омагнічена вода	3,93	102,50	395,00		2,13	0,45	0,26	
	Вапняне молоко	4,80	100,90	533,30		1,58	1,73	0,20	
	NaHCO ₃	3,92	104,20	464,20		1,82	0,65	0,22	
	Na ₂ CO ₃	4,90	100,90	461,74		1,83	1,36	0,22	
	Пісковик, ш. Дніпровська «ДТЕК-Павлоградвугілля»	Вантаж, що вільно падає (ударний копер)							
		Не насичений ПАР	9,00	102,50	61,10	3,43	-	-	1,70
Вапняне молоко		9,14	105,80	67,50	3,11	1,56			
NaHCO ₃		9,17	105,84	60,00	3,50	1,80			
Na ₂ CO ₃		8,50	104,20	82,20	2,55	1,26			
Вибух									
Не насичений ПАР		5,20	104,0	212,1	-	4,00	0,85	0,50	
Вапняне молоко		5,15	116,2	242,4		3,50	0,88	0,48	
NaHCO ₃		4,90	110,9	229,2		3,70	0,94	0,48	
Na ₂ CO ₃		4,52	116,21	278,6		3,00	0,85	0,42	
Пісковик, ш. А.Скочинського, «ПраО Донвугілля»	Вантаж, що вільно падає (ударний копер)								
	Не насичений ПАР	10,00	153,00	84,80	2,50	-	-	1,80	
	Омагнічена вода	9,15	153,00	171,0	1,22			0,90	
	Вапняне молоко	8,73	153,00	286,0	0,73			0,53	
	NaHCO ₃	9,99	142,50	75,50	2,78			1,88	
	Na ₂ CO ₃	9,39	153,00	230,0	0,91			0,66	
	Вибух								
	Не насичений ПАР	6,90	142,50	541,00	-	1,56	1,60	0,26	
	Омагнічена вода	5,94	-	543,30		1,55	0,78	0,26	
Вапняне молоко	4,70	764,10		1,10		0,66	0,19		
NaHCO ₃	4,84	667,20		1,10		2,52	0,21		
Na ₂ CO ₃	5,83	486,40		1,73	0,53	0,30			

Продовження табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вапняк, ПрАО «ДФДК»	Вантаж, що вільно падає (ударний копер)							
	He насичений ПАР	8,14	105,80	49,00	4,28			2,15
	Вапняне молоко	8,39	110,90	99,80	2,10			1,20
	NaHCO ₃	7,22	107,50	111,40	1,88			0,96
	Na ₂ CO ₃	7,97	107,50	46,70	4,50			2,30
	Вибух							
	He насичений ПАР	5,38	109,2	37,0		22,8	0,19	2,95
	Вапняне молоко	5,75	107,5	73,7		11,46	0,18	1,45
	NaHCO ₃	5,44	112,6	142,0		6,00	0,31	0,80
	Na ₂ CO ₃	4,39	110,9	146,3		5,77	0,78	0,76
Вугілля, ш. Терновська «ДТЕК Павлоградвугілля», пл. С ₅ ^В	Вантаж, що вільно падає (ударний копер)							
	He насичений ПАР	5,70	102,5	245,0	0,86			0,41
	Вапняне молоко	5,50	100,9	265,6	0,80			0,38
	NaHCO ₃	6,40	100,9	232,6	0,90			0,43
	Na ₂ CO ₃	4,67	104,6	281,5	0,75			0,37
	Вибух							
	He насичений ПАР	2,61	97,60	521,40		1,62	0,53	0,19
	Вапняне молоко	2,54	99,20	557,80		1,51	0,53	0,17
	NaHCO ₃	1,09	80,60	780,60		1,00	0,90	0,10
	Na ₂ CO ₃	1,60	79,20	584,50		1,44	0,52	0,13
Вугілля-антрацит, пл. к ₅ ¹ , ш. Свердловська «ДТЭК-Свердловантрацит»	Вантаж, що вільно падає (ударний копер)							
	He насичений ПАР	3,94	91,26	211,32	0,99			0,43
	Вапняне молоко	4,62	91,26	218,32	0,96			0,42
	NaHCO ₃	4,06	92,82	211,45	0,99			0,44
	Вибух							
	He насичений ПАР	1,77	97,60	864,20		0,97	1,02	0,11
	Вапняне молоко	1,44	91,26	816,70		1,03	0,93	
NaHCO ₃	1,40	89,70	801,70		1,05	0,94		

Висновки.

Аналіз гранулометричних та енергетичних характеристик зразків порід вуглепородної товщі, зруйнованих вільним ударом та вибухом, показав, що при цілеспрямованій зміні властивостей порід під впливом ПАР (омагнічена вода, вапняне молоко, харчова та кальцинована сода) змінюється характер їх руйнування.

Зокрема, при збільшенні лужності розчинів ПАР (зложена вода → вапняне молоко → NaHCO₃ → Na₂CO₃) спостерігається стійке зменшення питомої енергії руйнування вибуховими навантаженнями кварцових порід (пісковиків). При руйнуванні цих порід

ударними навантаженнями вплив ПАР практично непомітно.

Особливо помітно вплив ПАР на характер руйнування вапняку, коли при дії вибухових навантажень питома енергія руйнування при насиченні цієї породи кальцинованою содою зменшується вчетверо (з 22,80 до 4,50 Дж/см²). Вплив ПАР на вапняк, руйнований вільним ударом незначний. Разом з тим, використання для насичення зразків вапняку вапняного молока та харчової соди призводить до зменшення питомої енергії руйнування вдвічі (з 4,28 до 2,10 та 1,88 Дж/см²) порівняно із зразками не насиченими ПАР.

Насичення вугілля різного ступеня вуглефікації практично не впливає на

енергоємність їх руйнування при дії ударних та вибухових навантажень, хоча для насиченого поверхнево-активними речовинами антрациту спостерігається незначне (порядку 5-6%) збільшення питомої енергоємності руйнування вибуховими навантаженнями.

Встановлено також, що вплив ПАР на породи, що складають вуглепородний масив (пісковики, вапняки, вугілля), не призводить до істотної зміни середнього діаметра фрагментів їх руйнування ударними та вибуховими навантаженнями. Проте спостерігається слабке зменшення їхнього середнього розміру (трохи більше 5-15 %) у разі зростання лужності розчинів.

Використання поверхнево-активних речовин дозволяє, таким чином, зменшувати питому енергію руйнування при впливі на породу динамічних навантажень різної інтенсивності (удар, вибух), що створює основу розробки нових енергозберігаючих способів дроблення вуглепородного масиву.

Список літератури

1. Комашенко В.И., Воробьев Е.Д., Лукьянов В.Г. Разработка технологии взрывных работ, уменьшающей вредное воздействие на окружающую среду. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. Томск, 2017. Т. 328. № 8. С. 33-40.
2. Mukherjee A.K., Bhattacharya S.K., Saiyed H.N. Assessment of respirable dust and its free silica contents in different Indian coalmines. *Industrial health*. 2005. No. 43. P. 277-284.
3. Ефремов Э.И., Бересневич П.В., Мартыненко В.П., Борисов В.И. Проблемы экологии массовых взрывов в карьерах. Днепропетровск: Січ, 1996. 177с.
4. Ефремов Э.И., Петренко В.Д., Кратковский И.Л., Шеленок В.В. Экспериментальные результаты разрушения полиминеральных сред при взрывном и механическом воздействии. *Высокоэнергетическая обработка материалов: материалы междунар. конф.* Днепропетровск, 2000. С. 44-49.
5. Кулинич В.Д., Воробьев В.В., Чебенко В.Н. Исследование влияния поверхностно-активных веществ на прочностные характеристики скальных горных пород при различных типах воздействия. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. 2017. Вип. 2/2017(20). С. 43-49.
6. Долударева Я.С., Козловская Т.Ф., Лемижанская В.Д., Комир А.И. Влияние поверхностно-активных веществ на изменение прочностных характеристик горных пород. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. 2012. Вип. 1. С. 8-16.
7. Латышев О. Г., Осипов И.С., Еремизин А.Н., Карасев К.А. Активизация процессов зарождения и развития трещин в поверхностно-активной среде при разработке пород невзрывчатыми разрушающими

составами. *Изв. вузов. Горный журнал*. 2012. № 1. С. 115-118.

8. Латышев О.Г. Казак О.О. Использование поверхностно-активных веществ в процессах бурения горных пород. *Вектор Геонаук*. 2018. Т.1. №2. С. 29-37.

9. Леушева Е.Л., Николаев Н.И. Анализ способов понижения твердости горных пород и методик выбора поверхностно-активных веществ для повышения эффективности буровых работ. *Вестник Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2014. № 12. С. 12-21.

10. Спосіб оцінки енергоємності руйнування анізотропних гірських порід при різних видах навантаження на моделях: пат. 95218 Україна: МПК7 G01N 3/00, E21C 39/00. №2014 07830; заявл. 11.07.2014; опубл. 11.07.2014, Бюл. № 23 5 с.

11. ДСТУ ГОСТ 21153.0:2019. Породы горные. Отбор проб и общие методы физических испытаний. [Чинний від 2019-02-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 1975.

12. ДСТУ Б В.2.7-114-2002 Суміші бетонні. Методи визначення щільності. . [Чинний від 2002-07-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2002.

13. ДСТУ ГОСТ 28985:2008. Породы гірські. Метод визначення деформаційних характеристик при одноісному стисненні. [скасований у 2015]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2008.

14. ГОСТ 21153.7-75. Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн. [скасований у 2015]. Вид. офіц. Київ: Изд-во стандартов Держспоживстандарт України, 1975.

15. Яланский, А.А., Паламарчук Т.А., Скипочка С.И. Временные методические указания по экспресс-определению упругих свойств горных пород ультразвуковым методом на необработанных образцах керн геологоразведочных скважин. ВНИМИ. 1987.

16. Барон Л.И., Логунов Б.М., Позин Е.З. Определение свойств горных пород. Гос.научн.-техн.изд.лит. по горному делу. 1962.

17. Долударева Я.С., Козловская Т.Ф., Лемижанская В.Д., Комир А.И. Влияние поверхностно-активных веществ на изменение прочностных характеристик горных пород. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. 2012. 1(9). С. 8-16.

18. Вибуховий прилад конденсаторний (ВПК-1): пат. 59776 Україна: МПК7 F42D 3/04. № u2010 14552; заявл. 06.12.10; опубл. 25.05.2011, Бюл. № 10.

19. Вибуховий прилад конденсаторний: пат. 98546 Україна: МПК7 F42D 1/05. № a2010 12302. заявл. 18.10.10; опубл. 25.05.2012, Бюл. № 10.

20. Результати досліджень твердіючої набійки зарядів вибухівки. Савельев Д.В., Шайхлісламова І.А., Юрченко А.А., Лутс І.О. *Збірник наукових праць НГУ. Дніпро: Національний ТУ «Дніпровська політехніка», 2020. №63, С. 49-60. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/63.049>*

References

1. Komashchenko V.I., Vorobev Ye.D., Lukyanov V.G. (2017). Razrabotka tekhnologii vzrивnikh работ, umenshayushchei vrednoe vozdeystvie na okruzhayushchuyu sredyu. *Izvestiya Tomskogo*

politekhničeskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. Tomsk, 2017. T. 328. № 8. S. 33-40

2. Mukherjee A.K., Bhattacharya S.K., Saiyed H.N. (2005). Assessment of respirable dust and its free silica contents in different Indian coalmines. *Industrial health*. 2005. No. 43. P. 277-284.

3. Yefremov E.I., Beresnevich P.V., Martinenko V.P., Borisov V.I. (1996). *Problemi ekologii massovikh vzrivov v karerakh*. Dnepropetrovsk: Sich, 1996. 177s.

4. Efremov E.I., Petrenko V.D., Kratkovskii I.L., Shelenok V.V. (2000). Eksperimentalnie rezultati razrusheniya poliminerálních sred pri vzrивnom i mekhanicheskom vozdeistvii. *Visokoenergeticheskaya obrabotka materialov: materiali mezhdun. konf.* Dnepropetrovsk, 2000. S. 44-49.

5. Kulnich V.D., Vorobev V.V., Chebenko V.N. (2017). Issledovanie vlianiya poverkhnostno-aktivnikh veshchestv na prochnostnie kharakteristiki skalnikh gornikh porod pri razlichnikh tipakh vozdeistviya. *Suchasni resursoenergozberigayuchi tekhnologii girnichogo virobništva*. 2017. Vip. 2/2017(20). S. 43-49.

6. Doludareva Ya.S., Kozlovskaya T.F., Lemizhanskaya V.D., Komir A.I. (2012). Vliyanie poverkhnostno-aktivnikh veshchestv na izmenenie prochnostnikh kharakteristik gornikh porod. *Suchasni resursoenergozberigayuchi tekhnologii girnichogo virobništva*. 2012. Vip. 1. S. 8-16.

7. Latishev O. G., Osipov I.S., Yeremizin A.N., Karasev K.A. (2012). Aktivizatsiya protsessov zarozhdeniya i razvitiya treshchin v poverkhnostno-aktivnoi srede pri razrabotke porod nevzrivchatimi razrushayushchimi sostavami. *Izv. vuzov. Gornii zhurnal*. 2012. № 1. S. 115-118.

8. Latishev O.G. Kazak O.O. (2018). Ispolzovanie poverkhnostno-aktivnikh veshchestv v protsessakh bureniya gornikh porod. *Vektor Geonauk*. 2018. T.1. №2. S. 29-37.

9. Leusheva Ye.L., Nikolaev N.I. (2014). Analiz sposobov ponizheniya tverdsti gornikh porod i metodik vibora poverkhnostno-aktivnikh veshchestv dlya povisheniya effektivnosti burovikh rabot. *Vestnik Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*. 2014. № 12. S. 12-21.

10. Sposib otsinky enerhoiemnosti ruinuvannya anizotropnykh hirs'kykh porid pry riznykh vydakh navantazhennia na modeliakh: pat. 95218 Ukraina: MPK7

G01N 3/00, E21S 39/00. №2014 07830; zaiavl. 11.07.2014; opubl. 11.07.2014, Biul. № 23 5 s.

11. DSTU HOST 21153.0:2019. Porody hornnye. Otbor prob y obshchye metod fizycheskykh usptanyi. [Chynnyi vid 2019-02-01]. Vyd. ofits. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 1975.

12. DSTU B V.2.7-114-2002 Sumishi betonni. Metody vyznachennia shchilnosti. [Chynnyi vid 2002-07-01]. Vyd. ofits. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2002.

13. DSTU HOST 28985:2008. Porody hirski. Metod vyznachennia deformatsiinykh kharakterystyk pry odnovisnomu stysnenni. [skasovanyi u 2015]. Vyd. ofits. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2008.

14. HOST 21153.7-75. Porody hornnye. Metod opredeleniya skorostei rasprostraneniya upruhykh prodolnykh y poperechnykh voln. [skasovanyi u 2015]. Vyd. ofits. Kyiv: Yzd-vo standartov Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 1975.

15. Yalanskii, A.A., Palamarchuk T.A., Skipochka S.I. (1987). Vremennie metodicheskie ukazaniya po ekspres-opredeleniyu uprugikh svoistv gornikh porod ultrazvukovim metodom na neobrabotannikh obraztsakh kerna geologorazvedochnikh skvazhin. VNIMI. 1987.

16. Baron L.I., Loguntsov B.M., Pozin Ye.Z. (1962). Opredelenie svoistv gornikh porod. Gos.nauchn.-tekhn.izd.lit. po gornomu delu. 1962.

17. Doludareva Ya.S., Kozlovskaya T.F., Lemizhanskaya V.D., Komir A.I. (2012). Vliyanie poverkhnostno-aktivnikh veshchestv na izmenenie prochnostnikh kharakteristik gornikh porod. *Suchasni resursoenergozberigayuchi tekhnologii girnichogo virobništva*. 2012. 1(9). S. 8-16.

18. Vybukhovyi pryklad kondensatornyi (VPK-1): pat. 59776 Ukraina: MPK7 F42D 3/04. № u2010 14552; zaiavl. 06.12.10; opubl. 25.05.2011, Biul. № 10.

19. Vybukhovyi pryklad kondensatornyi: pat. 98546 Ukraina: MPK7 F42D 1/05. № a2010 12302. zaiavl. 18.10.10; opubl. 25.05.2012, Biul. № 10.

20. Saveliev D.V., Shaikhliislamova I.A., Yurchenko A.A., Luts I.O. (2020). Rezultaty doslidzhen tverdiuchoi nabiiky zariadiv vybukhivky. *Zbirnyk naukovykh prats NHU. Dnipro: Natsionalnyi TU «Dniprovskaya politekhnik», 2020. №63, S. 49-60.* <https://doi.org/10.33271/crpnmu/63.049>.

Надійшла до редакції 01.10.2022

Савельєв Дмитро Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», (м. Дніпро, Україна).

E-mail: saveliev.d.v@nmu.one

Шайхлісламова Ірина Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», (м. Дніпро, Україна).

E-mail: shaikhliislamova.i.a@nmu.one

Столбченко Олена Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», (м. Дніпро, Україна).

E-mail: stolbchenko.o.v@nmu.one

STUDY OF THE ENERGY INTENSITY OF CARBON MASS DESTRUCTION

Purpose. Study of the physical and mechanical characteristics and energy intensity of the destruction of coal massif rocks by dynamic loads, taking into account the directional change in their properties.

The methods. To study and evaluate the energy intensity of the destruction of anisotropic rocks under dynamic loads, experimental studies were carried out in laboratory conditions. The selected samples were saturated with surfactants (surfactants). After the destruction of the samples by dynamic loads, the character of the destruction of the rock was evaluated by the granulometric characteristics using the method of optical microscopy. The energy intensity of the destruction was determined by the amount of work spent on the formation of a new surface of particles of rock destruction products.

Findings. The analysis of the granulometric and energy characteristics of samples of coal-bearing stratum rocks showed that with increasing alkalinity of surfactant solutions, a decrease in the specific energy of destruction by explosive loads of quartz rocks is observed. The effect of surfactants on the nature of limestone destruction is especially noticeable. Under the action of explosive loads, the specific energy of destruction when this rock is saturated with soda ash decreases. The saturation of coal with different degrees of coalification practically does not affect the energy intensity of their destruction under impact and explosive loads.

The originality. A method of estimating the energy intensity of the destruction of anisotropic rocks under dynamic loads has been developed, taking into account the directed change in their properties under the action of surfactants. The priority of the method is protected by a patent of Ukraine.

Practical implementation. The use of surfactants makes it possible to reduce the specific energy of destruction when the rock is subjected to dynamic loads, which creates the basis for the development of new energy-saving methods of crushing the coal massif.

Keywords: coal massif, explosive destruction, surfactants, granulometry, dispersion.

Saveliev Dmytro – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Labor safety and civil security, Dnipro University of Technology, (Dnipro, Ukraine).

E-mail: saveliev.d.v@nmu.one

Shaikhislamova Iryna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Labor safety and civil security, Dnipro University of Technology, (Dnipro, Ukraine).

E-mail: shaikhislamova.i.a@nmu.one

Stolbchenko Elena – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Labor safety and civil security, Dnipro University of Technology, (Dnipro, Ukraine).

E-mail: stolbchenko.o.v@nmu.one