

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.235.5: 622.271

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/24>**Коновал В.М.**

Черкаський державний технологічний університет

ОЦІНКА ХАРАКТЕРУ РУЙНУВАННЯ ТВЕРДОГО СЕРЕДОВИЩА ЗАРЯДАМИ ВР ЗМІННОЇ ФОРМИ ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ ЗА РІЗНИМИ УМОВАМИ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ ВИБУХУ

У дослідженні з метою обґрунтування нової конструкції заряду змінної форми поперечного перерізу: циліндричної, у вигляді призми – трикутної і квадратної форми перерізу було проведено експерименти на структурно-однорідних піщано-цементних моделях кубічної форми з ребром 150 мм шляхом порівняння результатів їх руйнуючої дії та чисельних показників амплітуди напружень в хвилі стискання під час вибуху однакових по масі зарядів ВР. Під час виготовлення моделей в металевій формі за допомогою вставок по її осі на глибину 85 мм формували циліндричні порожнини діаметром 10 мм для розміщення в них зарядів ВР циліндричної та у вигляді трикутної і квадратної призми, а також встановлювали п'єзоелектричні датчики на глибину 75 мм від верхньої межі моделі і на відстані від осі заряду 45 мм. Оцінку фізико-механічних властивостей руйнуючого середовища проводили на моделях кубічної форми з розміром ребра 40 ± 2 мм відповідно до чинних Держстандартів. Заряди ВР різних конструкцій формувались в підготовлених паперових патронах, зовнішній діаметр яких становив 0,95 діаметру зарядної порожнини. В якості ВР при руйнуванні моделей використовували промислове ВР типу Комполайн масою 2,0 г або відрізки детонуючого шнура (ДШ) для всіх серій експериментів. Підриг зарядів здійснювали відрізками ДШ довжиною 0,8 м, з'єднані в ланцюг з капсулем-детонатором або хвилеводом неелектричної системи ініціювання – НСІ типу NONEL або Прима ЕРА і вибуховим пристроєм конденсаторним ПІВ100. Експерименти проводились в полігонних умовах кар'єру «Сівач» Корсунь-Шевченківського РУ. Оцінку характеру руйнування моделей проводили методом ситового аналізу за даними яких будували залежності розподілу гранулометричного складу. Результати експериментів показали, що зниження пікового тиску продуктів детонації (ПД) на руйнуюче середовище (модель) досягається за рахунок передачі вибухового імпульсу на поверхню зарядної порожнини в кути профілю заряду, як квадратної так трикутної форми з формуванням різноградієнтних полів напружень в цих зонах.

Ключові слова: модель, заряд вибухової речовини, вибух, амплітуда напружень, різноградієнтне навантаження.

Постановка проблеми. Процеси гірничого виробництва за технологічною ознакою можна розділити на три основні групи: підготовка гірничої маси до виїмки, виїмково-навантажувальні та транспортні роботи, а також переробка корисних копалин (механічне дроблення, подрібнення та збагачення).

Першим і, в основному, визначальним процесом, що впливає на ефективність екскавації, транспортування та переробки корисних копалин, є буропідригні роботи. При цьому бурові роботи відносяться до найбільш консервативних, що визначено типом існуючих бурових верстатів, і відповідним діаметром свердловин на кар'єрах, як правило, їх не змінюють протягом усього тер-

міну експлуатації родовища. Разом з тим, для управління енергією вибуху та забезпечення якісного дроблення гірських порід діаметр заряду (свердловини) має велике значення. Таким чином, рівень підготовки гірничої маси при існуючому буровому обладнанні, з урахуванням властивостей порід, що руйнуються (міцності та їх структурних особливостей) залежить, перш за все, від ефективності вибухових робіт. Вони включають широкий комплекс засобів і технологічних операцій, а саме: вибір типу вибухових речовин (ВР) та засобів ініціювання, діаметр і конструкцію свердловинного заряду ВР, схеми ініціювання, що обумовлюють взаємодію окремих зарядів ВР та їх груп, умови підригання (рівень обводненості

масиву порід, наявність підпірної стінки), тип застосовуваної набивки.

Тому вибір і обґрунтування удосконалених конструкцій свердловинного заряду є однією із умов створення сучасних ресурсозберігаючих вибухових технологій руйнування гірських порід складної будови на кар'єрах рудних і нерудних корисних копалин.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Як відомо, значна частина енергії вибуху витрачається в зоні, що безпосередньо примикає до зарядної порожнини (зазвичай 2-3 радіусу заряду), де відбувається перездрібнення твердого середовища, що веде до втрат корисної копалини на кар'єрах будівельних матеріалів.

Регулювання величини питомої енергії вибуху при руйнуванні гірських порід, як доведено у роботі Єфремова Э.И. [1], можливо різними шляхами. Зокрема, це досягається за рахунок зміни площі безпосереднього контакту свердловинного заряду вибухових речовин (далі – ВР) з породою, що руйнується, або створення умов, що забезпечують зниженню динамічного впливу вибуху на поверхню зарядної порожнини [1-3].

Для ефективного управління дією вибуху необхідно враховувати, що межа міцності гірських порід на розтягання і зрушення приблизно в 10 разів менше за межу міцності гірських порід на стискання. А оскільки енергоємність руйнування твердих середовищ пропорційна квадрату їх межі міцності при конкретному виду навантаження, то енергоємність руйнування твердих середовищ розтягуючими зусиллями в 100 разів менша за енергоємність руйнування при дії стискаючих напружень. При цьому корисна дія вибуху циліндричних зарядів при руйнуванні гірських порід може бути підвищена шляхом регулювання величини питомої енергії ВР за його довжиною у поєднанні зі збільшенням ролі розтягуючих напружень в твердому середовищі, що руйнується при використанні подовжених комбінованих зарядів: розосереджених інертними, повітряними та водними проміжками, змінного діаметру по висоті колонки та різної форми поперечного перерізу.

З вище сказаного існує низка способів формування свердловинних зарядів, як по його довжині, так і у поперечному перерізу. Зокрема, це:

- формування по висоті зарядної порожнини суцільної конструкції свердловинних зарядів ВР [4];

- створення у пробурених циліндричних порожнинах розширених ділянок діаметром більшим за діаметр первинної порожнини [5-6];

- розташування всередині зарядної порожнини суцільної колонки ВР в поліетиленових оболонках змінного діаметру, у формі конуса які поступово зменшуються в діаметрі до гирла свердловини і з різною конфігурацією поперечного перерізу [7-8];

- розташування всередині зарядних порожнин порожнистих та іншої форми фігур з інертних матеріалів [9-10].

- застосування свердловинних зарядів, розосереджених повітряним проміжком [11-13].

Найбільшого поширення при відбійці гірських порід на кар'єрах набули свердловинні заряди ВР суцільної конструкції, що пояснюється спрощенням операцій під час їх формування. Основний недолік суцільного свердловинного заряду полягає в тому, що при вибуху такого заряду руйнування породи відбувається безпосередньо при контакті з зарядом ВР. Роботу заряду, розосередженого інертним матеріалом, відбувається як дія двох самостійних зарядів. Характер руйнування гірських порід у цьому випадку подібна до руйнування, що відбувається при вибуху заряду ВР суцільної конструкції [14]. Наявність інертної набивки ускладнює інтерференцію вибухових хвиль між суміжними частинами розосередженого заряду, у результаті якого коефіцієнт використання енергії вибуху підвищується в незначній мірі.

Одним із способів більш ефективного використання енергії вибуху при руйнуванні гірських порід є застосування свердловинних зарядів, розосереджених повітряним проміжком [11-13]. При створенні в свердловинному заряді повітряних проміжків можна не тільки знизити ударний пік тиску за рахунок повітряних порожнин, а й збільшити час дії вибуху на масив, а також напруженість породи за рахунок взаємодії ударних хвиль, що розповсюджуються по масиву порід від двох розосереджених частин заряду при одночасному їх ініціюванню. Ударна хвиля, що рухається в свердловині, не тільки забезпечує всьому процесу динамічність, а й безперервно передає в середовище свою енергію, що і визначає підвищення інтенсивності дроблення гірських порід.

Ефективність свердловинних зарядів, розосереджених повітряними проміжками доведена багаторічною практикою вибухових робіт, як у кар'єрах, так і у підземних умовах при відбійці порід різної міцності.

На жаль, метод підривання свердловинних зарядів, розосереджених повітряними проміжками, не отримав подальшого розвитку через

складність формування повітряних проміжків та збільшення обсягів видобутку обводнених гірських порід.

У той самий час, для кар'єрів нерудної промисловості зменшення площі контакту ВР і породи, що реально досягається під час створення повітряних проміжків, дуже актуально з позиції зменшення виходу дрібних (перездрібнених) фракцій. Вирішення цієї проблеми в умовах кар'єрів Докучаєвського флюсо-доломітного комбінату стало можливим після створення спеціального замикаючого пристрою кумулятивної дії [15]. Випробування проводилися під час відбійки необхідних гірських порід. Встановлено, що вихід фракції дроблення менше 200 мм на ділянках з використанням свердловин з повітряними проміжками, за рівних умов підривання (міцність порід та питома витрата ВР), на 5-14 % нижче, ніж на ділянках свердловин із зарядом суцільної конструкції. При цьому було забезпечено високу якість дроблення порід навіть при зменшенню на 10-15% питомих витрат ВР на експериментальних ділянках, що дозволило за рахунок зменшення частки нерегульованого дроблення на рівні набивки знизити в 1,2-1,3 рази вихід негабариту, обсягу перездрібнених порід і тим самим пилогазових викидів в атмосферу кар'єрів.

В останні роки з'явилися реальні способи та засоби формування повітряних проміжків при відбійці обводнених гірських порід [16], які пройшли випробування на гранітних кар'єрах.

Роль основних руйнуючих чинників під час вибуху (хвиль напружень і газоподібних продуктів детонації) залежить від структури гірських порід. За наявності води у твердому середовищі із суцільної структури під час вибуху знижується амплітуда тиску на контакті з ВР. Однак зі збільшенням обсягу зарядної порожнини під дією ударної хвилі (далі – УХ) тиск в обводненому середовищі може виявитися вищим, ніж у необводненому, що може призвести до збільшення загального обсягу зруйнованого середовища. І не дивлячись на те, що напруження у хвилі стискання в обводнених середовищах вище, ніж у необводнених, на практиці спостерігається погіршення дроблення порід вибухом.

При цьому розв'язання проблеми інтенсифікації дроблення порід, як зазначалося вище, у верхній частині уступу на рівні набивки, можна здійснювати за рахунок розосередження колонки заряду ВР інертними проміжками із бурового шламу, відсіву, глини або повітряним і водним проміжком [4]. У місцях розташування інертних

проміжків, внаслідок зниження тиску продуктів детонації на стінки зарядної порожнини, руйнуюча дія вибуху знижується, що істотно важливо для підприємств нерудної промисловості.

Так у роботі [17] встановлено, що вплив на гірський масив подовжених циліндричних зарядів характеризується величиною питомої енергії, що припадає на одиницю його бічної поверхні. Це означає, що зі збільшенням діаметра порожнини руйнуюча здатність заряду зростає. Однак це має місце тільки при забезпеченні умов повного замикавання заряду ВР у середовищі, що руйнується. Для свердловинних зарядів, що мають вихід на денну поверхню, зі збільшенням діаметра заряду різко погіршується замикавання їх набивкою, внаслідок чого знижується коефіцієнт корисної дії енергії вибуху. Це призводить до погіршення якості вибухового дроблення та опрацювання підшви уступу.

Таким чином, підвищити корисну дію вибуху при руйнуванні гірських порід можна використовуючи заряди свердловин, розосереджених як повітряним, так інертним проміжком, інертним кільцевим і зазором між поверхнею ВР і стінкою свердловини [18]. При цьому маса ВР у свердловині зменшується, проте запасу енергії може бути достатньо для руйнування породи. При цьому підвищення ефективності дії вибуху досягається за рахунок збільшення часу дії вибуху на масив та його різноградієнтного навантаження по довжині заряду. Чим більша поверхня контакту заряду ВР та породи, тим більша частина енергії вибуху використовується на руйнування породи. Тоді поверхня контакту породи з зарядом постійної маси залежить від форми поперечного перерізу і щільності ВР, яким заповнена свердловина. Збільшення поверхні заряду постійного об'єму та маси досягається за рахунок зменшення діаметра заряду, що призводить до поліпшення дроблення гірської породи.

Цей ефект реалізований, зокрема, при застосуванні подовжених зарядів змінного діаметру [7-8]. При цьому заряди формуються шляхом розміщення в пробурених свердловинах поліетиленових оболонок (рукавів) змінного діаметру, заповнених ВР. При зміні діаметра заряду ВР змінюється енергія, що трансформується в масив гірських порід, виникає різноградієнтне поле напружень, в якому зростає роль напружень розтягання при руйнуванні породи. Ефективність таких зарядів підтверджено при відбійці гірських порід в умовах залізрудних та флюсових кар'єрів України.

Свердловинні заряди змінного діаметру формувались за допомогою поліетиленових рукавів, діаметр різних ділянок яких становив 180 та 250мм. Дослідження показали, що використання зарядів ВР змінного діаметру, при скороченні витрати ВР на 10-15%, забезпечило поліпшення руйнуючої дії вибуху свердловинних зарядів за рахунок підвищення ролі напружень розтягання, а саме до зниження обсягу перездрибнених фракцій, що дуже важливо для кар'єрів нерудної промисловості.

Пошук раціональної конструкції свердловинного заряду для підвищення ефективності вибухових робіт призвів до створення вдосконаленого способу котлових розширень по висоті свердловини [6]. Реалізація нового способу вперше була здійснена в умовах кар'єрів ПівдГЗК. Свердловини з котловими розширеннями були створені за допомогою верстатів вогневого буріння. Надалі були спроби формуванню котлових розширень механічним способом, проте вони не набули розвитку. Можливість забезпечити якісне дроблення порід при зменшенні витрат ВР сприяла пошуку нетрадиційного способу створення котлових розширень у свердловинних зарядах плазмовим способом [5].

Рішення сформульованих вище проблем потребує впровадженню невідкладних заходів щодо вдосконалення існуючих та розробці нових технічних рішень по ефективності відбійки міцних гірських порід складної будови з урахуванням гірничотехнічних та гідрогеологічних умов розробки корисних копалин.

У зв'язку з цим дослідження, пов'язані з вибором і обґрунтуванням нової конструкції свердловинного заряду, наприклад, змінної форми поперечного перерізу є основою раціональних технологічних параметрів нових ресурсозберігаючих способів відбійки гірських порід, що базуються на врахуванні тріщино-тектонічної будови масиву і анізотропії їх фізико-механічних властивостей, залишаються актуальними і на теперішній час.

Робота виконується відповідно до комплексної програми Національної академії наук України по розробці безвідходних технологій видобування корисних копалин відкритим способом, а саме «Науковому обґрунтуванню та розвитку безвідходних технологій видобування корисних копалин відкритим способом зі зменшенням їх шкідливого впливу на навколишнє середовище» (№ ДР 0120U101113) та Договору про науково-технічне співробітництво між ІТТМ НАН України та

Черкаським технологічним університетом МОН України.

Постановка завдання. Метою роботи є проведення експериментальних досліджень по виборі і обґрунтуванню конструкції подовженого заряду ВР різної форми поперечного перерізу. Для досягнення мети проведено комплексні дослідження на підготовлених структурно-однорідних піщано-цементних моделях кубічної форми по оцінці характеру руйнування твердого середовища, хвильової дії вибуху зарядів ВР різної форми поперечного перерізу та за різними умовами передачі енергії вибуху. За отриманими результатами дроблення моделей побудовані кумулятивні криві розподілу гранулометричного складу і виконано аналіз цих результатів.

Виклад основного матеріалу дослідження.

1. Експериментальні дослідження руйнування твердого середовища зарядами ВР різної форми поперечного перерізу та за різними умовами передачі енергії вибуху

Для вивчення руйнуючої і хвильової дії вибуху подовжених зарядів різної форми поперечного перерізу в твердому середовищі розроблена методика експериментальних досліджень, які проводились в полігонних умовах кар'єру «Сівач» Корсунь-Шевченківського кар'єроуправління ПрАТ «Укragроввибухпром», в основу якої обрано положення розробленого способу моделювання вибухового руйнування гірських порід [19] та відомих методик [20].

Метою експериментальних досліджень було обґрунтування нових конструкцій подовжених зарядів різної форми поперечного перерізу шляхом порівняння руйнуючої та показників амплітуди напружень в хвилі стискання від вибуху однакових по масі зарядів ВР. При цьому проводилось порівняння результатів руйнування вибухом моделей при зміні не тільки конструкційних параметрів зарядів ВР, а і умов передачі енергії вибуху руйнуючому середовищу. Таке моделювання дозволяє отримати якісні та кількісні результати руйнування, які необхідні для перевірки в промислових умовах.

Методикою передбачено проведення *дві серії* експериментальних досліджень з різними формами зарядних порожнин: циліндричної, квадратної і трикутної на піщано-цементних моделях.

Для проведення першої серії експериментальних досліджень по вивченню руйнуючої і хвильової дії вибуху зарядів ВР різної форми перерізу були виготовлені моделі кубічної форми з ребром 150 мм з піщано-цементної однорідної

суміші при співвідношенні компоненті 1:1 з додаванням 0,5 % води. Підчас виготовлення моделей в центрі її розміщують вставки різної форми поперечного перерізу – циліндричну, квадратну і трикутну на глибину $(0,5-0,6)h_{\text{мод}}$, а на відстані $(8-10)r_0$, від осі заряду на глибину $0,5h_{\text{мод}}$ встановлюють п'єзоелектричні датчики так, щоб площа датчиків була перпендикулярна напрямку хвилі стискання від вибуху заряду ВР (рис. 1). П'єзодатчики, встановлені в моделях, представляли собою квадранти круглих дисків діаметром $d = 14,8$ мм і товщиною $h = 0,65$ мм.

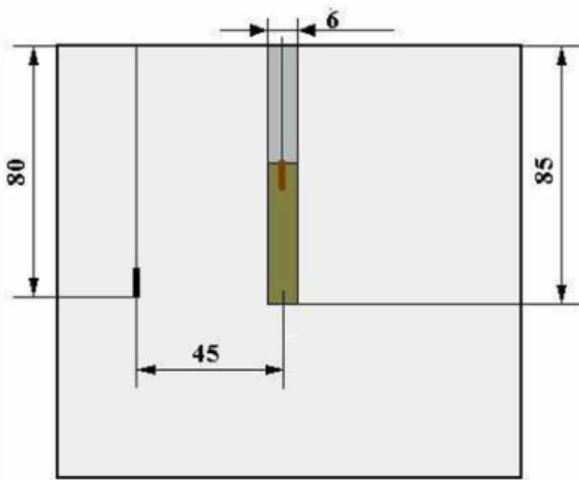


Рис. 1. Схема розташування в моделі п'єзодатчиків відносно заряду ВР

Перед установкою в моделі були заміряні електричні ємності круглих дисків, а потім з урахуванням того, що електрична ємність пропорційна площі плоского конденсатора, розраховувались електричні ємності п'єзодатчиків, встановлених в моделях.

Площа кожного датчика (S_d) дорівнювала 1/4 площі круглого диску діаметром 14,8 мм і становила відповідно $S_d = 4,3 \cdot 10^{-5}$ м². Тарировка

п'єзоелектричних датчиків здійснювалась методом резонансу-антирезонансу, а потім розрахунковим шляхом визначено п'єзомодуль d_{33} кожного датчика [21]. Параметри застосовуваних п'єзоелектричних датчиків і електричні амплітуди сигналів, зареєстровані ними, наведені в табл. 1.

У підготовлених зарядних порожнинах формували заряди різного поперечного перерізу – циліндричної, квадратної і трикутної форми з використанням ВР типу Комполайт ГС-6. Вибухову суміш розташовували в підготовлені паперові патрони різної форми. Маса ВР в заряді становила 2,0 г для всіх серій експериментів, а в якості набивки використовували кварцовий пісок фракції 0,25 мм. Питома витрата ВР становила – 0,3 кг/м³. Висота колонки заряду в залежності від його перерізу коливалась в межах 25-35 мм. Ініціювання зарядів здійснювали відрізками хвилеводу довжиною 0,8 м НЕСІ Імпульс», ПРИМА ЕРА з'єднаний з капсулем-детонатором. Конструкції зарядів наведено на рис. 2.

Так, як руйнуюча дія вибуху сильно залежить від фізико-механічних і міцних властивостей твердого середовища, одночасно з виготовленням основних моделей виготовлялись зразки для визначення щільності ρ , швидкості поздовжніх хвиль C_p і міцності на одновісне стискання $\sigma_{\text{ст}}$ матеріалу моделей. Зразки для визначення фізико-механічних властивостей мали форму куба з ребром 40 ± 2 мм. Швидкість поздовжніх хвиль визначали за допомогою розробленого в ІГТМ НАН України стенду [22], а визначення щільності зразків і випробування їх на міцність при одновісному стисканні проводились на стандартному обладнанні і відповідно до чинних Держстандартів [23-26].

Вибухи проводилися в товстостінній металевій вибуховій камері, внутрішня поверхня якої футерована гумою. Під час вибуху зарядів ВР в моде-

Таблиця 1

Параметри п'єзоелектричних датчиків

№№ датчика (табл.)	Електрична ємність, пФ, $C \cdot 10^{-10}$	Площа датчика, $S_d \cdot 10^{-5}$, м ²	П'єзомодуль $d_{33} \cdot 10^{-10}$, К/Н	Електрична амплітуда сигналів U, В	Чутливість осцилографа	
					по амплітуді, В/дел	по довжині мкс/дел
1 (41)	0,164	8,6	3,13	220	20	50
2 (43)	0,152	8,6	2,93	280		
3 (28)	7,85	4,3	2,86	160		
4 (48)	0,148	8,6	2,50	220		
5 (25)	7,65	4,3	2,77	220		
6 (48)	0,148	8,6	2,50	300		
7 (25)	7,65	4,3	2,77	260		

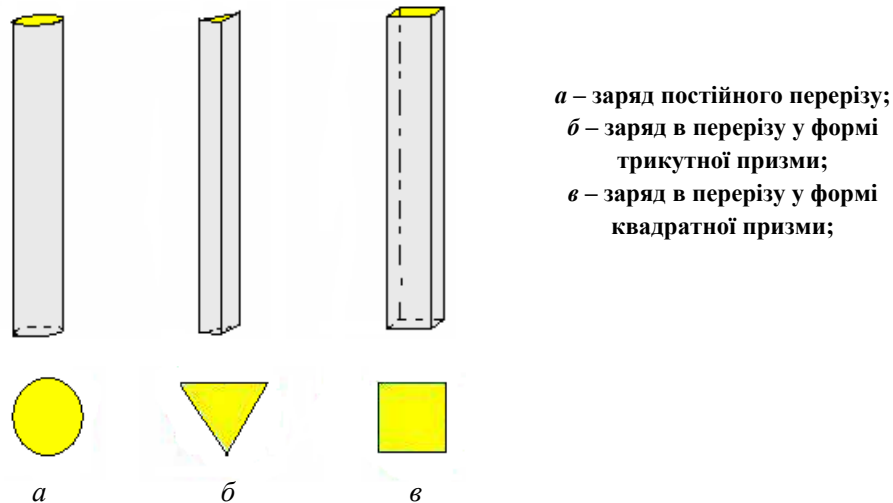


Рис. 2. Конструкції зарядів ВР

лях максимальні механічні напруження в хвилі стискання, перетворювались п'єзоелектричними датчиками в електричні сигнали, які надходили на цифровий осцилограф типу OWON, серії POS 58225, який має внутрішню пам'ять. Перед вимірами проводили калібрування осцилографу і встановлювали необхідну для даного експерименту чутливість його по амплітуді і тривалості імпульсу, отриманих при пробних вибухах. Зареєстрована датчиками інформація кодується і передається на обчислювальний комплекс – NOTEBOOK, де з використанням програмного забезпечення (ПЗ) обробляється і виводилася на монітор в діалоговому вікні у вигляді осцилограми з числовими даними по всьому діапазону вимірювань. По осцилограмам визначали максимальні величини напружень і тривалість імпульсу [19].

Для обґрунтування ефективності і вибору найбільш прийнятної конструкції заряду ВР проводили порівняльну оцінку результатів руйнування моделей зарядами ВР різної форми поперечного перерізу. Зруйновану модель із камери струшують в ємність і далі проводять її гранулометричний аналіз по відомим методикам [27] з використанням набору лабораторних сит типу СЛ-200 № 58 та аналізатору ситового А30 для оцінки гранулометричного складу на макрорівні. Отримані результати заносять в таблиці і обробляють їх, по яким будують кумулятивні криві і гістограми розподілу гранулометричного складу n від їх розміру d зруйнованої моделі подовженим зарядом ВР різної форми поперечного перерізу з використанням Додатку Microsoft Excel.

По отриманим даним результатів руйнування моделі, що характеризують якість дроблення

моделі зарядом ВР різної форми поперечного перерізу, розраховують діаметр середнього куску, площу новоутвореної поверхні зруйнованої моделі та інші енергетичні показники за відомими залежностями [19]. Результати обробки експериментальних даних наведено в табл. 2 за якими побудовані кумулятивні криві розподілу гранулометричного складу зруйнованих моделей зарядами ВР різної форми (рис. 3 і рис. 4) і гістограми розподілу фракційного складу продуктів руйнування моделі вибухом (рис. 5 і рис. 6).

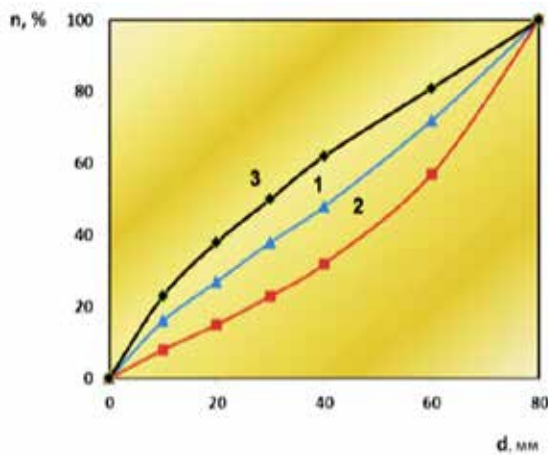
Порівняльний аналіз результатів дроблення твердого середовища і показників амплітуди напружень в хвилі стискання дозволив встановити, що під час вибуху зарядів постійної форми перерізу по висоті колонки напруження в хвилі стискання нижче (0,14 ГПа), ніж напруження від вибуху зарядів у цій порожнині квадратної і трикутної форми перерізу через проміжне середовище – повітря (0,17 ГПа і 10,2 ГПа відповідно). Це свідчить про те, що під час вибуху зарядів ВР у формі квадратної і трикутної призми при переміщенні фронту детонаційної і ударної хвиль (далі – ДХ і УХ) і випереджаючи у часі фронти ДХ і УХ в зарядах суцільної конструкції (постійної форми перерізу), в кутах їх концентруються максимальні амплітудні значення напружень в хвилі стискання з формування різноградієнтних силових полів. Такий механізм навантаження твердого середовища сприяє збільшенню впливу зсувних і напружень розтягання над стискаючими. Це призводить до рівномірності дроблення моделі вибухом заряду ВР зі збільшенням виходу великих фракцій розміром $d_1 > 50$ мм, в 1,5-2,0 рази площі новоутвореної поверхні і зниження діаметру середнього

куску на 5-10% для зарядів в перерізу квадратної і трикутної призми.

Для обґрунтування і подальшого прогнозування гранулометричного складу продуктів руйнування твердого середовища в залежності від конструкції заряду ВР і умов передачі енергії вибуху **була проведена друга серія** експериментальних досліджень в полігонних умовах кар'єру «Сівач» з використанням наведеної вище методики досліджень. Основна відмінність якої полягає в тому, що під час виготовлення моделей з ребром рівним 150 мм одна частка моделей виготовлялась із однорідної піщано-цементної

суміші, заповнювачем якої був м'який річковий пісок, при їхньому співвідношенні 1:1:0,5, а інша частка моделей виготовлювалась із заповнювача – м'який річковий пісок + гранітний відсів діаметром фракцій 5-10 мм з додаванням затворювача – цемент марки М400 + вода при співвідношенні компонентів 1:1:0,5.

Підготовлене цементне тісто заливали в спеціальні залізні форми з розміром ребра 150x150x150 мм. В центрі кожної моделі в процесі її виготовлення формували зарядні порожнини розміщенням вставок циліндричної форми діаметром 16 мм на глибину 80 мм. Після



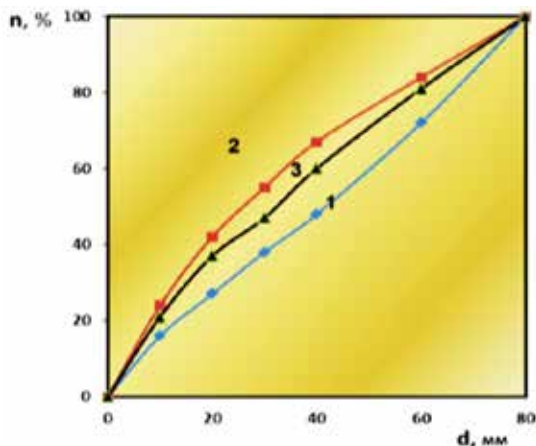
1– заряди ВР постійного перерізу; 2 і 3 відповідно – трикутна і квадратна призма

Рис. 3. Кумулятивні криві розподілу фракцій дроблення n від їх розміру d зруйнованих вибухом моделей зарядами ВР різної форми поперечного перерізу при передачі енергії ВР через проміжне середовище – повітря

Таблиця 2

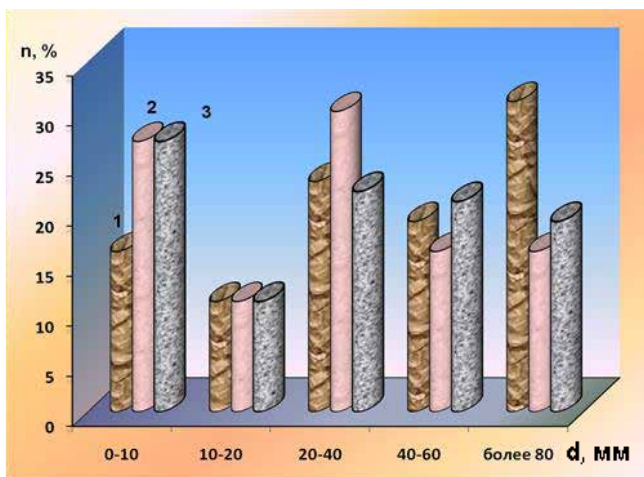
Результати руйнування піщано-цементних моделей від дії вибуху заряду ВР різної форми поперечного перерізу за різними умовами передачі енергії вибуху середовищу, що руйнується

Конструкції зарядів	Маса моделі, m , кг	Діаметр середнього куску d_{cp}	Склад фракцій (%), в зруйнованих вибухом моделях		Напруження в хвилі стискування, ГПа	Новоутворена поверхня S_n , cm^2
			$d_i < 20$ мм	$d_i > 50$ мм		
Заряд постійного перерізу	5,735	41,83	27,0	53,0	0,14	83010
Заряд у вигляді квадратної призми, розміщений в циліндричній порожнині з повітряним проміжком	6,476	35,8	31,0	45,0	0,17	171408
Заряд у вигляді трикутна призма, розміщений в циліндричній порожнині з повітряним проміжком	6,319	49,0	20,0	60,0	10,2	98600
Заряд в моделі – квадратна призма, розміщений к хвилі напружень	6,596	32,8	32,0	40,0	0,15	225006
					0,20	
Заряд в моделі – трикутна призма, розміщений к хвилі напружень	6,601	31,2	37,0	32,0	14,2	237828
					16,7	



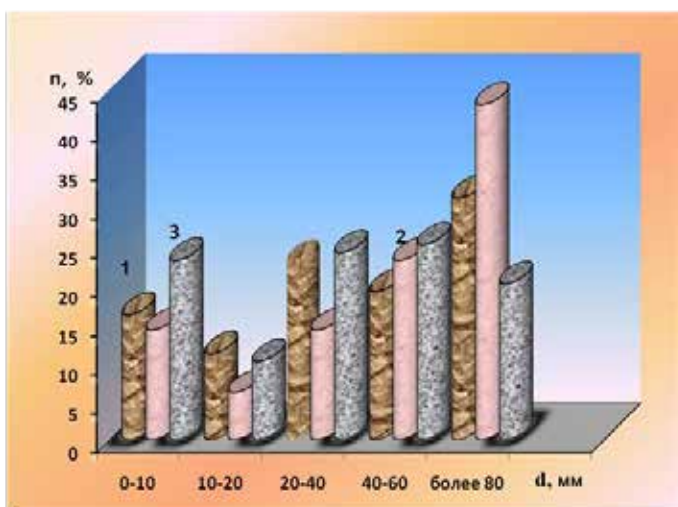
1– заряди ВР постійного перерізу; 2 і 3 відповідно – трикутна і квадратна призма

Рис. 4. Кумулятивні криві розподілу фракцій дроблення n від їх розміру d зруйнованих вибухом моделей зарядами ВР різної форми поперечного перерізу при безпосередньому контакті поверхні заряду з руйнуючим середовищем



1– заряди ВР постійного перерізу; 2 і 3 відповідно – трикутна і квадратна призма

Рис. 5. Гістограма розподілу фракцій дроблення n від їх розміру d зруйнованих вибухом моделей зарядами ВР різної форми поперечного перерізу при передачі енергії ВР через проміжне середовище – повітря



1– заряди ВР постійного перерізу; 2 і 3 відповідно – трикутна і квадратна призма

Рис. 6. Гістограма розподілу фракцій дроблення n від їх розміру d зруйнованих вибухом моделей зарядами ВР різної форми поперечного перерізу при безпосередньому контакті поверхні заряду з руйнуючим середовищем

отримання 30 % міцності моделей їх виймали з форми і витримували на повітрі до набрання максимальної міцності згідно діючих Держстандартів [23-24].

Для проведення **2 – ї серії експериментів** було виготовлено 19 моделей по 3 шт. для кожного виду навантажень і однієї для пробного вибуху. Разом з виготовленням основних моделей виготовлялись зразки для оцінки фізико-механічних властивостей твердого середовища, що руйнується згідно діючих Держстандартів [22, 25-26]. Результати фізико-механічних властивостей матеріалу моделей наведені в табл. 3.

В підготовлених для руйнування моделей з різними фізико-механічними властивостями в зарядні порожнини встановлювали паперові гільзи, які мають форму в перерізу у вигляді трикутної, квадратної призми і циліндру (рис. 2) з розміщенням в них вибухової речовини типу «Комполіт ГС-6» вагою 2г з ініціатором – капсулем-детонатором, з'єднаною з неелектричною системою ініціювання – НСІ «Імпульс» або ПРИМА ЕРА.

Сформовані конструкції зарядів ВР в моделях з різними фізико-механічними властивостями підривали вибуховим приладом конденсаторним типу ППВ 100 з наступними умовами передачі енергії вибуху руйнуючому середовищу. Так, в одній групі моделей простір навколо гільз зарядів трикутної і квадратної форми заповнювали піском, водою і залишали повітряний проміжок, а в іншій групі моделей, в яких розташовували циліндричні заряди, колонка його мала безпосередній контакт з поверхнею зарядної порожнини. Підготовлені моделі розташовували в вибуховій камері і підривали.

Оцінку результатів руйнування проводили по розподілу гранулометричного складу зруйнованої вибухом моделей методом ситового аналізу за відомими методиками [27] з використанням набору лабораторних сит типу СЛ-200 № 58 та аналізатору ситового А30. Отримані результати заносять в таблиці і обробляють їх з використанням Додатку Microsoft Excel.

По результатам дроблення моделей вибухом визначали: загальну масу зруйнованої вибухом моделі, вміст дрібних фракцій, вміст великих фракцій, площа новоутвореної поверхні і діаметр середнього куску. Отримані результати дозволили побудувати кумулятивні криві розподілу гранулометричного складу зруйнованої моделі конструкціями зарядів ВР різної форми перерізу (рис. 7. і рис. 8) і гістограми фракційного складу продуктів руйнування n від їх розміру d за різних умов вибухового навантаження твердого середовища (рис. 9 і рис. 10).

Аналіз результатів експериментальних досліджень дозволив встановити, що використання подовжених зарядів ВР різної форми перерізу – трикутної, квадратної форми за різними умовами навантаження (проміжне середовище – повітря, вода, пісок) досягається рівномірність дроблення руйнуючого середовища в порівнянні з зарядом циліндричної форми. Особливо це доведено при руйнуванні обводненого середовища. Це свідчить про те, що змінюється механізм вибухового навантаження за рахунок переважаючих зсувних та розтягуючих напружень.

Результати проведених досліджень дозволили створити умови по розробці нової ресурсозберігаючої технології руйнування міцних гірських порід складної будови з використанням комбінованих свердловинних зарядів з регульованою

Таблиця 3

Фізико-механічні властивості матеріалу моделей

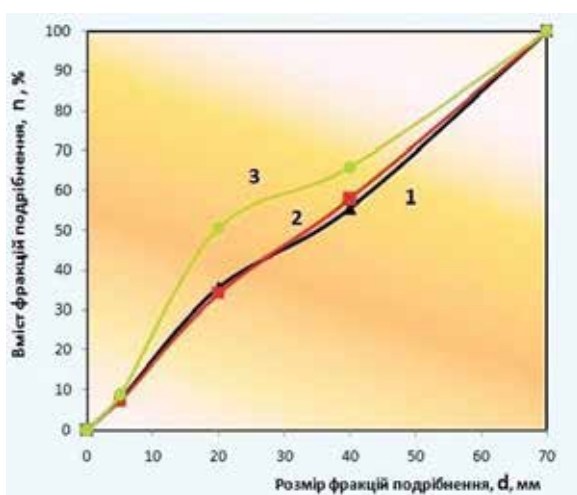
Тип моделей	Маса зразків, $m \cdot 10^{-3}$, кг	Щільність, ρ , кг/м ³	Швидкість повздожніх хвиль, C_p , м/с	Міцність на стискання, $\sigma_{ск}$, МПа
Піщано-цементна модель з додаванням води в співвідношенні 1:1:0,5	Середні показники, 131,2	Середні показники 1910	Середні показники 3080	Середні показники 130,0
	Середньоквадратичне відхилення, Δ , кг/м ³	30	40	1,7
	Коефіцієнти варіації, $v_{вар.}$, %	1,6	1,6	6,9
Піщано-цементна модель з додаванням гранітного відсіву і води в співвідношенні 1:1:1:0,5	Середні показники, 235,3	Середні показники 1510	Середні показники 4085	Середні показники 26,0
	Середньоквадратичне відхилення, Δ , кг/м ³	35	40	1,7
	Коефіцієнт варіації, $v_{вар.}$, %	1,8	1,8	7,9

енергією вибуху за рахунок зміни площі контакту ВР зі стінками зарядної порожнини і питомої енергії вибуху, що передається гірській породі через бічну поверхню заряду та може забезпечити отримання реального економічного ефекту за рахунок рівномірності дроблення породи, зниження об'єму перездрібнених фракцій та витрат на вибухові матеріали.

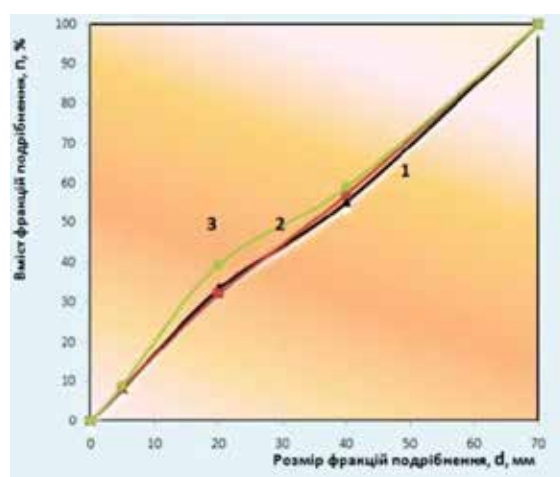
Висновки. У результаті дослідження отримані такі результати:

– експериментально встановлено, що під час вибуху зарядів постійної форми перерізу по висоті колонки напруження в хвилі стискання нижче (0,14 ГПа), ніж напруження від вибуху зарядів у цій порожнині квадратної і трикутної форми перерізу через проміжне середовище – повітря (0,17 ГПа і 10,2 ГПа відповідно).

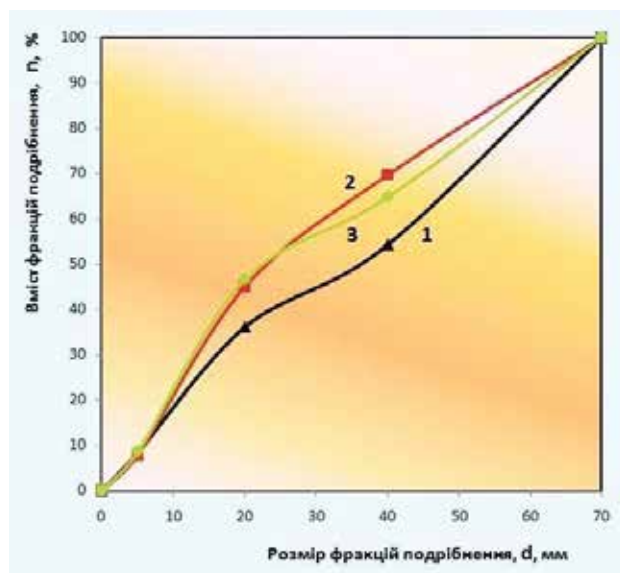
– доведено, що під час вибуху зарядів ВР у формі квадратної і трикутної призми при переміщенні фронту детонаційної і ударної хвиль (далі –



а



б



в

а) повітря; б) вода; в) пісок; 1, 2 і 3 – заряди ВР різної форми перерізу: трикутної, квадратної і у вигляді кола відповідно

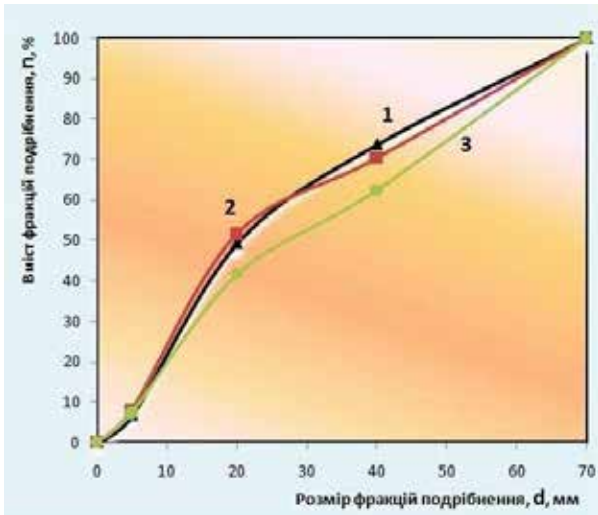
Рис. 7. Кумулятивні криві розподілу фракцій дроблення n від їх розміру d зруйнованих вибухом структурно-однорідних піщано-цементних моделей зарядами ВР різної форми перерізу за різними умовами передачі енергії вибуху ВР через проміжне середовище

ДХ і УХ) і випереджаючи у часі фронти ДХ і УХ в зарядах суцільної конструкції (постійної форми перерізу), в кутах їх концентруються максимальні амплітудні значення напружень в хвилі стискання з формування різноградієнтних силових полів.

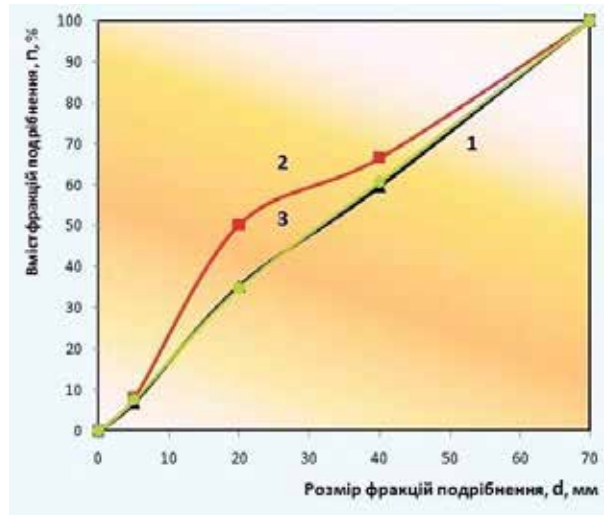
– встановлено, що отриманий механізм навантаження твердого середовища сприяє збільшенню впливу зсувних і напружень розтягання над стискаючими. Це призводить до рівномірності дроблення моделі вибухом заряду

ВР зі збільшенням виходу великих фракцій розміром $d > 50$ мм, в 1,5-2,0 рази площі новоутвореної поверхні і зниження діаметру середнього куску на 5-10% для зарядів в перерізу квадратної і трикутної призми.

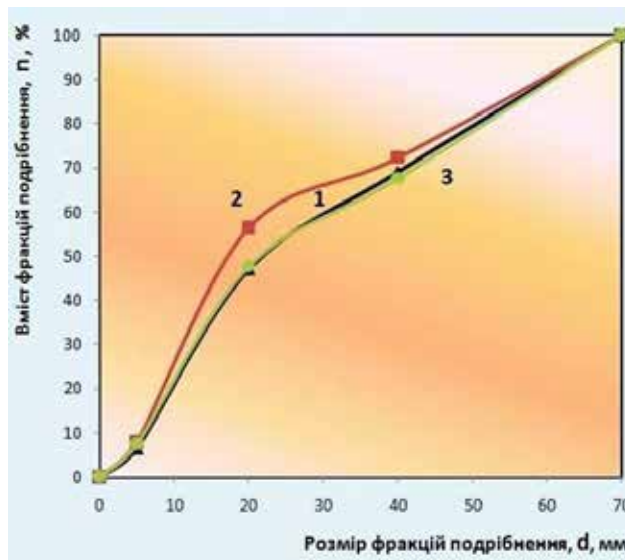
– отримані результати досліджень сприятимуть пошуку та розробці нових технічних рішень по підвищенню ефективності руйнування міцних гірських складної будови енергією вибуху на кар'єрах нерудних корисних копалин.



а



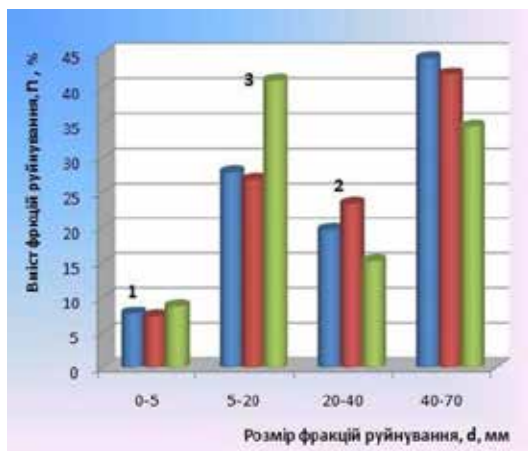
б



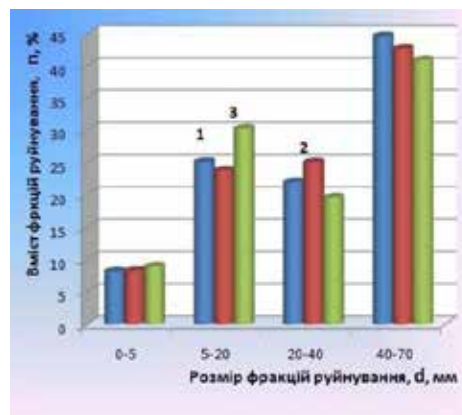
в

а) повітря; б) вода; в) пісок; 1, 2 и 3 – заряди ВР різної форми перерізу: трикутної, квадратної і у вигляді кола відповідно

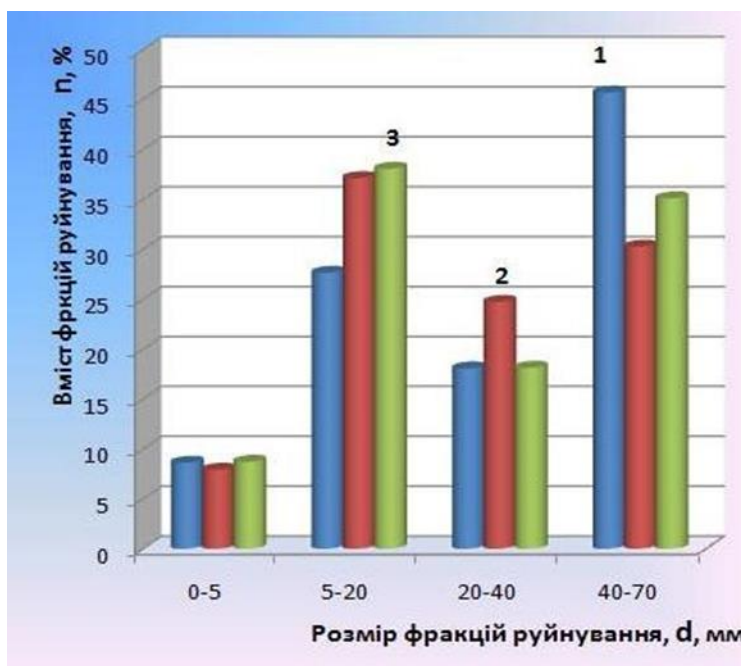
Рис. 8. Кумулятивні криві розподілу фракцій дроблення n від їх розміру d зруйнованих вибухом моделей з відмінними фізико механічними властивостями зарядами ВР різної форми перерізу за різними умовами передачі енергії ВР через проміжне середовище



a



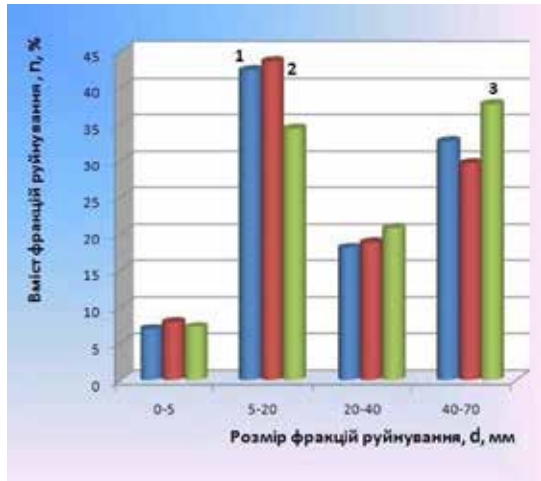
б



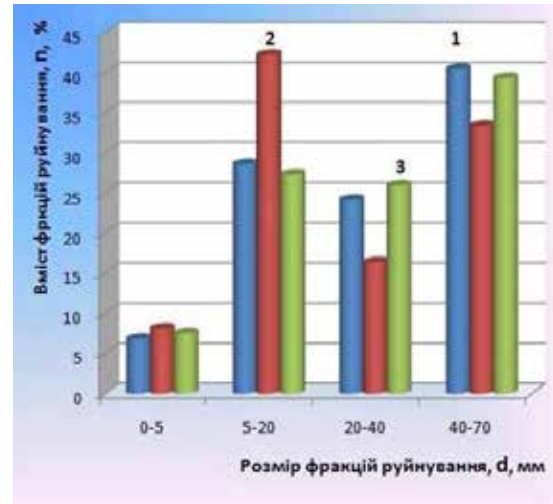
в

а) повітря; б) вода; в) пісок; 1, 2 и 3 – заряди ВР різної форми перерізу: трикутної, квадратної і у вигляді кола відповідно

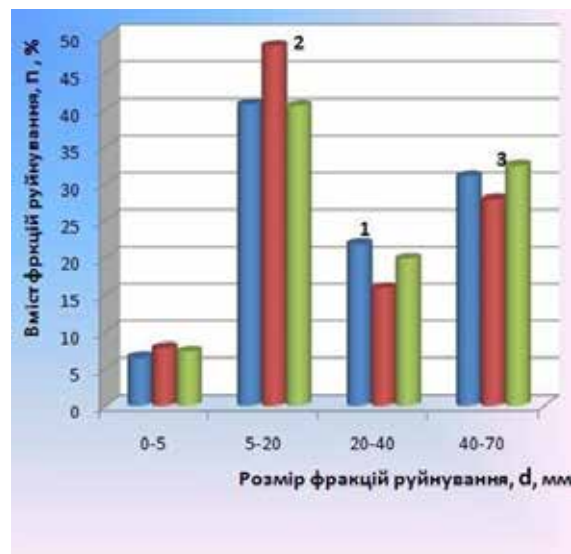
Рис. 9. Гістограми розподілу фракцій дроблення п від їх розміру d зруйнованих вибухом структурно-однорідних піщано-цементних моделей зарядами ВР різної форми перерізу за різними умовами передачі енергії вибуху ВР через проміжне середовище



а



б



в

а) повітря; б) вода; в) пісок; 1, 2 и 3 – заряди ВР різної форми перерізу: трикутної, квадратної і у вигляді кола відповідно

Рис. 10. Гістограми розподілу фракцій дроблення p від їх розміру d зруйнованих вибухом моделей з відмінними фізико механічними властивостями зарядами ВР різної форми перерізу за різними умовами передачі енергії ВР через проміжне середовище

Список літератури:

1. Ефремов Э.И. Подготовка горной массы на карьерах. М.: Недра, 1980. 272с.
2. Ефремов, Э.И. Управление размерами зоны переизмельчения горных пород при их взрывном разрушении / Весник Криворожского технического университета. Кривой Рог, 2007. Вып.18. С. 36-39.
3. Ефремов Э.И., Комир В.М., Чебенко В.Н., Ромашко А.М. Влияние типа ВВ и условий взрывания на переизмельчение нерудных полезных ископаемых: Матер.международ. конф. «Форум горняков- 2010». Днепропетровск: НГУ, 2010. С. 60-63.
4. Барон В.Л., Кантор В.Х. Техника и технология взрывных работ в США.-М.:Недра,1989. 376с
5. Булаг А.Ф., Никифорова В.А., Осенний В.Я. Повышение эффективности буровзрывных работ в крепких рудах / Весник Кременчужского гос. политехн. ун-та. 2006 (37). Вып. 2. Част.2. С. 93-94.
6. Белоконь В.П., Ильин В.И., Белоконь М.П. и др. Эффективность отбойки горных пород системой сосредоточенных зарядов / Metallургическая и горнорудная промышленность. 1974. № 2. С. 59-60.
7. Ефремов Э.И., Белоконь М.П., Николенко Е.В., Баранник В.В., Пономарев А.В. Опытные промышленные испытания технологии заряжания и эффективности взрывания необводненных горных пород зарядами переменного диаметра / Геотехническая механика. 2005. № 58. С. 13-18.
8. Белоконь М.П., Николенко Е.В., Яицков К.В., Яны С.В. Опыт взрывания скважинных зарядов переменного диаметра по высоте уступа / Вісник Кременчужського держ. політехн. ун-ту. Кременчук, 2006. Вип.6 (41). част. 1. С. 56-60.
9. Ефремов Э.И., Никифорова В.А., Ищенко К.С. Способы взрывной отбойки горных пород зарядами переменного сечения / Современные ресурсосберегающие технологии горного производства. 2008(1). № 1. С. 7-10.
10. Шкуматов А.Н., Калякин С.А. Перераспределение импульса взрыва при помощи рефракторов / Взрывное дело № 98/55. М.: МВК по взрывному делу, 2007. С. 120-128.
11. Тищенко. С.В., Федоренко П.И., Еременко Г.И. [и др.]. Обоснование параметров скважинного заряда взрывчатого вещества с воздушным промежутком и отражателем из сыпучих материалов / Metallургическая и горнорудная промышленность. 2015. № 2. С. 90-93.
12. Комир В.М., Сокурченко В.А., Ромашко А.М. Эффективность различных конструкций зарядов при взрывной отбойке известняков на карьерах / Науковий вісник НГУ. 2005. № 10. С. 7-10.
13. Ефремов Э.И., Никифорова В.А., Пономарев А.В., Поляков Ю.С. Эколого-экономическая эффективность скважинных зарядов, рассредоточенных воздушными промежутками на карьерах нерудной промышленности. Науковий Вісник НГУ. 2008. № 3. С. 10-15.
14. Гончаров С.А. Разрушение горных пород, путем повышения его эффективности // Горн.журн. 1996. № 5. С.9-12
15. Пристрій для розосередження заряду ВР повітряним проміжком. пат. на корисну модель № 1576, Україна. / В.В. Воробйов, Г.В. Славко, В.Т. Щетинін, К.В. Лотоус та інші. 2003. Бюл. № 6.
16. Быков Е.К. Способ получения воздушных промежутков / УСИВ. 2006. № 3. С. 3-5.
17. Ефремов Э.И., Пономарёв А.В., Никифорова В.А. Влияние свойств ВВ размеры зоны переизмельчения при разрушении твердых сред / Науковий вісник НГАУ. 2001. № 1. С. 24-26.
18. Ефремов Э.И., Никифорова В.А., Ромашко А.М. О механизме разрушения горных пород цилиндрическими зарядами с кольцевыми инертными зазорами / Вісник Кременчужського національного університету. Кременчук: КрНУ, 2012. Вип. 1/2012(72). С. 127-130.
19. Спосіб моделювання вибухового руйнування гірських порід: пат. на винахід 110745 Україна / Іщенко К.С., Коновал С.В., Кратковський І.Л., Круковська В. В., Коновал В.М. № а 201408761; заявлено 04.08. 2014; опубл. 10.02. 2016. Бюл. № 3.
20. Комир В.М., Гейман Л.М., Кравцов В.С., Мячина Н.И. Моделирование разрушающего действия взрыва в горных породах. М.: Наука, 1972. 214 с.
21. Глозман И.А. Пьезоэлектрические материалы в электронной технике. М.-Л.: Энергия, 1965. 192 с.
22. Яланский А.А., Паламарчук Т.А., Скипочка С.И. [и др.]. Временные методические указания по экспресс-определению упругих свойств горных пород ультразвуковым методом на необработанных образцах керна геологоразведочных скважин РД. Л.: ВНИМИ, 1987. 41 с.
23. ГОСТ 21153.0-75. Породы горные. Отбор проб и общие методы физических испытаний. Введен с 01.07.75. М.: Изд-во стандартов, 1976. 20 с.
24. ГОСТ 10181.2-81. Смеси бетонные. Методы определения плотности. Введен с 01.01.81. М.: Изд-во стандартов, 1981. 25 с.
25. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Метод определения предела прочности при одноосном сжатии. Введен с 01.07.86. М.: Изд-во стандартов, 1986.10 с.
26. ГОСТ 21153.7-75. Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн. Введен с 01.01.75. М.: Изд-во стандартов, 1976. 35 с.
27. Барон Л.И. Кусковатость и методы ее измерения. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 124 с.

Konoval V.M. EVALUATION OF THE NATURE OF SOLID ENVIRONMENT DESTRUCTION BY CHARGES OF VARIABLE CROSS-SECTION FORM UNDER DIFFERENT CONDITIONS OF EXPLOSION ENERGY TRANSMISSION

In the study to substantiate the new design of the charge of variable cross-sectional shape: cylindrical, prism-shaped – triangular and square cross-sectional experiments were conducted on structurally homogeneous sand-cement models of cubic shape with a rib of 150 mm by comparing the results of their destructive action and numerical indicators the amplitude of the stresses in the compression wave during the explosion of the same mass of explosive charges. During the manufacture of models in metal form with the help of inserts along its axis to a depth of 85 mm formed cylindrical cavities with a diameter of 10 mm to accommodate the charges of cylindrical explosives and triangular and square prisms, and installed piezoelectric sensors to a depth of 75 mm the upper limit of the model and at a distance from the axis of the charge of 45 mm. Evaluation of physical and mechanical properties of the destructive environment was performed on cubic models with a rib size of 40 ± 2 mm in accordance with current State Standards. Explosive charges of various designs were formed in prepared paper cartridges, the outer diameter of which was 0.95 diameter of the charging cavity. As explosives in the destruction of models used industrial explosives type Compoline weighing 2.0 g or pieces of detonating cord (LH) for all series of experiments. The charges were detonated by LS segments 0.8 m long, connected in a chain with a detonator capsule or a waveguide of a non-electric initiation system – NSI type NONEL or Prima EPA and an explosive device condenser PIV100. The experiments were conducted in the field conditions of the Sivach quarry of the Korsun-Shevchenkivsky Regional University. The nature of the destruction of the models was assessed by the method of sieve analysis, according to which the dependences of the particle size distribution distribution were constructed. The results of experiments showed that the reduction of peak pressure of detonation products (PD) on the destructive medium (model) is achieved by transmitting an explosive impulse to the surface of the charging cavity in the corners of the charge profile, both square and triangular with different gradient stress fields in these zones.

Key words: model, explosive charge, explosion, voltage amplitude, multi-gradient load.