

# РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.235.5: 622.271

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/35>**Коновал В.М.**

Черкаський держаний технологічний університет

**Ищенко К.С.**

Інститут геотехнічної механіки імені М.С. Полякова Національної академії наук України

## ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РІЗНОГРАДІЄНТНОГО ВИБУХОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТВЕРДОГО СЕРЕДОВИЩА ПО ДОВЖИНІ ЗАРЯДУ ЗМІННОГО ПЕРЕРІЗУ

У дослідженні теоретично розкрито механізм дії подовженого заряду ВР змінного перерізу. Проведені розрахунки показали, що зменшення виділеної під час вибуху енергії відбувається за рахунок не тільки зменшення маси ВР, а й зміни показників теплоти вибуху, причому використання сферичних вставок (куль) усередині ВР призводить до посилення дії ударної хвилі та створення різноградієнтного навантаження, що збільшує показники напружень розтягання на середовище, що руйнується. З метою обґрунтування нової конструкції заряду змінного перерізу проведено експериментальні дослідження на структурно-однорідних піщано-цементних моделях шляхом порівняння ре-зультатів їх руйнівної дії із зарядами інших конструкцій, а також чисельних показників амплітуди напружень у хвилі стискання під час вибуху однакових по масі зарядів ВР. Для цього в лабораторних умовах були виготовлені моделі кубічної форми з ребром 150 мм із піщано-цементного тіста в пропорції 1:1 із додаванням 0,5% води. Для затворення суміші використовували цемент марки М 500. Під час виготовлення моделей у металевій формі за допомогою вставок по її осі на глибину 85 мм формували циліндричні порожнини діаметром 10 мм для розміщення в них зарядів ВР, також установлювали п'єзоелектричні датчики на глибину 75 мм від верхньої межі моделі й на відстані від осі заряду 45 мм, а в торці – на відстані 20 мм уздовж її осі. Їх розміщали в моделі так, щоб площина поверхні датчиків були перпендикулярні напрямку хвилі стискання від вибуху зарядів ВР. Оцінку фізико-механічних властивостей руйнівного середовища по визначенню щільності  $\rho$ , швидкості поздовжніх хвиль  $C_p$  і міцності на однісіне стискання матеріалу моделей проводили на моделях кубічної форми з розміром ребра  $40 \pm 2$  мм відповідно до чинних Держстандартів. Їх виготовляли одночасно з виготовленням осно-вних моделей. Заряди ВР різних конструкцій формувалися в підготовлених паперових патронах, зовнішній діаметр яких становив 0,95 діаметра зарядної порожнини. Як ВР при руйнуванні моделей використовували промислове ВР Комполайн масою 3,5 г або відрізки детонуючого шнура (ДШ) для всіх серій експериментів. Підриг зарядів здійснювали відрізками ДШ довжиною 0,8 м, з'єднані в ланцюг із капсулем-детонатором або хвилеводом неелектричної системи ініціювання – НСІ типу NONEL і вибуховим пристроєм конденсаторним ППВ100. Експерименти проводилися в полігонних умовах кар'єру «Сі-вач» Корсунь-Шевченківського РУ. Продукти руйнування розділяли на фракції методом ситового аналізу, за даними яких будували залежності розподілу гранулометричного складу. Результати експериментів показали, що зниження пікового тиску продуктів детонації (ПД) на масив досягається за рахунок виходу високотемпературного газового потоку на контакт із проміжним середовищем – сферичною вставкою, яка заповнена повітрям.

**Ключові слова:** модель, заряд вибухової речовини, вибух, амплітуда на-пружень, різноградієнтне навантаження.

**Постановка проблеми.** Україна має значні поклади рудних і нерудних корисних копалин, які сконцентровані в масиві міцних гірських порід метасоматичного й метаморфічного походження Українського щиту (далі – УЩ). Ці породи являють

собою складну будову, їх відбійка потребує додаткових заходів щодо ефективного їх руйнування, які пов'язані з удосконаленням наявних і розробкою нових ефективних ресурсозберігаючих методів руйнування й переробки корисних копалин, механізації

виробничих процесів з використанням високотехнологічного обладнання, сучасних вибухових матеріалів (далі – ВМ), якісного планування й організації робіт на кар'єрах. При цьому ефективність дії вибуху зарядів вибухових речовин (далі – ВР) у гірських породах визначається їх здатністю виконувати корисну роботу з дроблення й переміщення гірничої маси. З наведеного вище випливає, що ефективність управління процесом вибуху залежить від правильного вибору конструкції заряду ВР. Під конструкцією заряду розуміють сукупність таких геометричних і технологічних параметрів, як форма заряду та зарядної камери, місце розташування точки ініціювання, комбінації застосовуваних ВР, довжина заряду, співвідношення частин заряду, заповнених ВР і набивкою. За геометричним принципом подовжені заряди розділяються на дві основні групи: заряди з постійним і змінним перерізом по їх висоті [1–4]. Заряди змінного перерізу мають явно виражені максимуми й мінімуми енергетичного потенціалу за їх висотою. Під час вибуху таких зарядів зростає роль розтягуючих напружень під час руйнування гірських порід, енергоємність руйнування якими на порядок нижче, ніж стискаючих. Удосконалення конструкції свердловинного заряду є одним із основних способів підвищення коефіцієнта використання енергії вибуху та зниження собівартості вибухового руйнування гірських порід складної будови на кар'єрах рудних і нерудних корисних копалин.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вибір раціональної конструкції свердловинного заряду з метою підвищення ефективності вибухового руйнування міцних гірських порід складної будови став підставою для розробки та промислового освоєння відомого способу руйнування порід свердловинними зарядами змінного діаметру по висоті уступу з урахуванням енергетичного підходу до розрахунку параметрів заряду [5]. Показано [6], що заміна суцільного свердловинного заряду постійного поперечного перерізу системою зосереджених зарядів, що розташовуються в котлових розширеннях уздовж осі свердловини, дає змогу:

- при постійній питомій витраті ВР за рахунок збільшення діаметра котлових розширень до 0,36–0,45 м сприяти зміні параметрів сітки розташування свердловин на уступі, як наслідок, підвищити вихід гірничої маси з 1 м свердловини на 15–25% без погіршення якості дроблення;
- на 10–15% знизити питомі витрати ВР при прогнозованому виходу відбитої гірничої маси з 1 м свердловини;
- на 30–35% зменшити обсяг буріння порівняно із суцільним діаметром свердловини.

Аналіз досліджень підтвердив, що використання зарядів ВР змінного перерізу сприяє підвищенню коефіцієнта корисної дії (далі – ККД) вибуху, поліпшенню ефективності та якості дроблення масиву гірських порід, забезпеченню економії ВР [7–8]. При цьому відзначено збільшення виходу фракцій менше 400 мм (до 85–90%) [9].

Однак у силу того, що формування порожнин у свердловині термічними методами є виборчим щодо типу порід (виключно присутність в породі кварцу), запропонований новий спосіб формування свердловинного заряду в поліетиленовій рукаві змінного діаметра [10], ефективність якого вперше перевірена в умовах Полтавського ГЗК.

Промислові вибухи щодо оцінки ефективності нової конструкції свердловинного заряду з використанням поліетиленового рукава змінного діаметру здійснені при відбійці необводнених гірських порід в умовах кар'єрів Докучаєвського флюсодоломітного комбінату [11–12]. Як ВР використовували водонестійке простого складу ВР, типу ПВС1У. Промислові випробування показали, що використання зарядів зміненого діаметру по висоті уступу дає змогу забезпечити:

- зменшення витрат ВР до 15% і, відповідно, скорочення пилогазових викидів в атмосферу кар'єрів;
- скорочення втрат корисних копалин завдяки зменшенню обсягу передрібною гірничої маси;
- зниження собівартості вибухових робіт через зменшення обсягів використання ВМ.

Управляти дробленням тріщинуватих і шаруватих гірських порід дає змогу також використання зарядів, які вздовж вісі свердловини мають звужені секції, розташовані на відстані один від одного, що дорівнює 4–6 діаметрам свердловини. У місці звужених секцій, між зарядом і стінкою свердловини, залишаються повітряні порожнини [13]. Аналогічні результати отримані при використанні зарядів змінного діаметра [4]. Вони дають можливість регулювати концентрацію енергії ВР по його довжині за рахунок формування в заряді осової порожнини змінного перерізу, яка збільшується до гирла свердловини.

Зміна діаметра заряду ВР можлива також при розміщенні всередині зарядної порожнини порожнистих вставок різної форми [14–16]. Об'ємні порожнисті фігури, запропоновані авторами [14], складаються з концентратора й розподільника. Для підвищення ефективності вибуху завдяки концентрації енергії в заряді та її перерозподілу стінки бічної поверхні хвостової частини об'ємних порожнистих фігур виконані увігнутими всередину й мають змінний радіус цієї поверхні.

Перерозподіл енергії ВР по колонці свердловинного заряду з посиленням його дії в перебури реалізується застосуванням технології турбодривання свердловинних зарядів із розміщенням по вісі заряду в центральній його частині турболізатора гвинтоподібної форми [17]. Функція його полягає в тому, щоб проходження по колонці заряду детонаційної хвилі (далі – ДХ), що впливає на нього своєю головною частиною і продуктами детонації (далі – ПД) протягом часу  $\Delta t$  і силою  $F(t)$ , спрямованої по вісі свердловини, дає змогу створювати кручений момент. Унаслідок цього при проходженні ДХ під впливом газоподібних ПД турболізатора надається імпульс обертально-поступального руху, він спрямовується слідом за ДХ. Обертання турболізатора призводить до утворення «вихорів», які забезпечують вимушену конвекцію ПД і тим самим сприяють більш повному їх згорянню у свердловині [18].

Для якісного опрацювання підшви уступу та зниження ймовірності її завищення варто застосовувати посилений заряд ВР у нижній частині свердловини за рахунок розміщення тут більш потужного ВР або розширення нижньої частини свердловини до створення котла діаметром 400 мм або іншими способами. Один зі способів відмови від перебури можливий лише в тому випадку, якщо для відбійки гірських порід використовувати конструкції зарядів ВВ з повітряною подушкою в донній частині свердловини, повітряних порожнин і проміжків [19]. Проведеними випробуваннями встановлено, що ударна хвиля (далі – УХ), досягнувши торця свердловини, відбивається, на її фронті різко зростає тиск. Він чинить додатковий вплив на нижню частину свердловини, що сприяє поліпшенню опрацювання підшви уступу та зменшенню до 50% довжини перебури.

Характер руйнування гірських порід складної будови залежить як від мікроструктури (орієнтування мікротріщин і фізико-механічних властивостей породоутворюючих мінералів), так і від макроструктури (просторового положення й морфології тріщин, які перетинають гірський масив). Тому досягнення високої якості вибухової підготовки гірничої маси, скорочення втрат корисних копалин і підвищення ефективності дії вибуху можливе за рахунок вибору й обґрунтування раціональних параметрів буропідричних робіт для цих умов [20] та умов передачі енергії вибухової речовини масиву гірських порід, що руйнується [21–22].

Так, встановлено, що застосування технології відбивання гірських порід блокової структури з

використанням вибухових свердловин діаметром 250 мм і розміщенням основної колонки заряду в анізотропному гірському масиві призводить до відділення блоків з розмірами, близькими до максимально допустимих для приймального бункера дробарки (1,2–1,3 м) [23–24]. Вирішення цієї проблеми досягається формуванням різноградієнтного навантаження масиву від вибуху зарядів у додатковій укороченій проміжній свердловині, що зменшує кількість негабаритних блоків [25].

Для регулювання якістю дроблення з отриманням прогнозованого гранулометричного складу підірваної гірничої маси та зниження витрат на дроблення необхідно провести коригування сітки розташування свердловин на уступі, зменшити діаметр свердловин з досить високою продуктивністю вибухової відбійки гірничої маси та її екскавації. Наприклад, в умовах родовища міді в кар'єрі Roşia Poieni (Romania) запропоновано використовувати діаметр свердловин від 200 до 150 мм. Буріння їх здійснювалося буровим обладнанням фірми Atlas Copco з мінімальними витратами на придбання бурового ставу та відповідного діаметра бурових коронок [26].

Результати промислових випробувань показали переваги використання свердловин діаметром 200 мм. Вихід негабариту не перевищив розміри більше 1000 мм, що призвело до зменшення часу на розподіл (дроблення) негабаритних блоків, зниження споживання електроенергії, підвищення ефективності роботи автосамоскидів при навантаженні й розвантаженні гірничої маси та збільшення погодинної продуктивності дробарки, типу ККД. Ефективне використання вибухової речовини у свердловині забезпечується за рахунок збільшення довжини колонки ВР і зменшення маси його в кожній свердловині приблизно до 100 кг, що дало змогу знизити вплив сейсмічної хвилі на масив, що руйнується при детонації ВР, зменшити площу розвалу гірничої маси, ступінь розтріскування масиву після вибухових робіт, що забезпечує стійкість уступів (берма, кут укосу уступу) та безпеку при транспортуванні рудної маси.

Рішення сформульованих вище проблем потребує впровадження невідкладних заходів щодо вдосконалення наявних і розробки нових технічних рішень стосовно ефективності відбійки міцних гірських порід складної будови з урахуванням гірничотехнічних і гідрогеологічних умов розробки корисних копалин.

У зв'язку з цим дослідження, пов'язані з вибором та обґрунтуванням нової конструкції свердловинного заряду, наприклад, змінного перерізу кумулятивної дії, який є основою раціональних



технологічних параметрів нових ресурсозберігаючих способів відбійки гірських порід, що базуються на врахуванні тріщинотектонічної будови масиву й анізотропії їх фізико-механічних властивостей, залишаються актуальними й сьогодні.

Робота виконується відповідно до комплексної програми Національної академії наук України з розробки безвідходних технологій видобування корисних копалин відкритим способом, а саме «Наукове обґрунтування та розвиток безвідходних технологій видобування корисних копалин відкритим способом зі зменшенням їх шкідливого впливу на навколишнє середовище» (№ ДР 0120U101113).

**Постановка завдання.** Метою роботи є проведення теоретичних та експериментальних досліджень щодо обґрунтування механізму дії заряду ВР з інертними вставками по його довжині.

Для досягнення мети проведено комплексні дослідження на підготовлених структурно-однорідних піщаноцементних моделях кубічної форми з оцінки характеру руйнування твердого середовища та хвильової дії вибуху зарядів ВР різних конструкцій. За отриманими результатами дроблення моделей побудовані кумулятивні криві розподілу гранулометричного складу й виконано аналіз цих результатів.

**Виклад основного матеріалу дослідження. 1.** Теоретичне обґрунтування механізму дії заряду ВР з інертними вставками по його довжині.

Регулювання розподілу енергії вибухової речовини по висоті заряду реалізується шляхом формування в зарядній порожнині вставок різного профілю: повітряних проміжків, порожнистих фігур з інертних або горючих матеріалів [3; 11; 14–17; 19–22; 27–30]. Експериментальні дослідження й досвід застосування конструкцій зарядів з інертними вставками різної форми свідчать про їх ефективність, що сприяє підвищенню коефіцієнта корисної дії енергії вибуху та його руйнівної дії за рахунок зміни механізму навантаження твердого середовища. Зокрема, це підтверджено під час вибуху зарядів ВР змінного перерізу з розміщеними по осі заряду сферичних вставок (куль) діаметром, який дорівнює половині діаметра свердловини, конструкцію якого розроблено в ІГТМ НАН України разом із Черкаським технологічним університетом МОН України [31].

У зв'язку з цим доцільно розглянути процеси, що протікають у зарядній порожнині при детонації ВР у таких зарядах. Для цього виділимо ділянку заряду, висота якого дорівнює діаметру циліндричної зарядної порожнини «d». У центрі цієї ділянки розташовується порожниста куля

з інертного матеріалу (полістиролу), діаметром  $d_{кул}$ , заповнена повітрям. За наявності порожнистої кулі всередині ВР зменшується маса ВР ( $m'_{вр}$ ) у зарядній порожнині (при  $m_{вр} = \rho_{вр} \frac{\pi d^3}{4}$ ):

$$m'_{вр} = \rho_{вр} \left( \frac{\pi d^3}{4} - \frac{\pi d_{кул}^3}{6} \right), \quad (1)$$

де  $\rho_{вр}$  щільність ВР.

Зміна маси ВР у зарядній порожнині залежно від діаметра кулі може бути представлено залежністю:

$$\eta = \rho_{вр} \left( 1 - \frac{2}{3} \frac{d_{кул}^3}{d^3} \right). \quad (2)$$

При  $d_{кул} = d/2$   $m'_{вр} = \frac{11}{48} \rho_{вр} \pi d^3$   $\eta = 11/12$ , тобто на  $\approx 8,3\%$  зменшується маса ВР у зарядній порожнині, отже, зменшується й частка енергії під час вибуху, яка трансформується в навколишнє середовище.

Варто зазначити, що наявність у вибуховій речовині малоактивних інертних матеріалів знижує теплоту вибуху ВР, оскільки частина енергії ВР витрачається на нагрів і термічний розклад цих матеріалів [32].

Оцінімо теплоту вибуху  $Q'$  вибухової речовини з розміщеною всередині неї порожнистою кулею масою  $M$ .

Масова частка матеріалу кулі в заряді:

$$\beta = \frac{M}{m'_{вр} + M}. \quad (3)$$

Величина  $Q'$  може бути визначена з рівняння:

$$m'_{вр} Q - M [C(T - T_o) + q_{тр} + q_{пов}] = (M + m'_{вр}) Q', \quad (4)$$

де  $C$  – теплоємність полістиролу, з якого виготовлено кулі;  $T$ ,  $T_o$  – початкові температури, відповідно, продуктів вибуху й матеріалу кулі;  $q_{тр}$  – теплота термічного розкладання полістиролу;  $q_{пов}$  – теплота нагрівання об'єму повітря, яке знаходиться в кулі.

З урахуванням того, що  $1 - \beta = \frac{m'_{вр}}{M + m'_{вр}}$  – це частка ВР у заряді,

$$Q' = Q(1 - \beta) - \beta [C(T - T_o) + q_{тр} + q_{пов}] \quad (5)$$

Таким чином, зменшення виділеної під час вибуху енергії відбувається не тільки за рахунок зменшення маси ВР, а й за рахунок зміни результуючої теплоти вибуху.

Для пояснення цього твердження розглянемо процеси, що протікають у зарядній камері з інертною сферичною вставкою (куля) при детонації в ній ВР. Спочатку на оболонку вставки діє УХ, яка є складником детонаційної хвилі, а потім розширюючи ПД. Наявність жорсткої оболонки на шляху поширення ударної хвилі по осі заряду призводить до того, що частина енергії УХ відбивається й направляється в бік стінок зарядної

порожнини. Коли зарядна порожнина розташована в твердому середовищі, при її руйнуванні наявність сферичних вставок усередині ВР призводить до посилення дії УХ на середовище, що руйнується. Ударна хвиля сприяє деформуванню та руйнуванню оболонки сферичної вставки. Далі на сферичну вставку впливають продукти детонації високої температури й тиску. Дуже високий тиск за фронтом ХД призводить до того, що вибухові гази спрямовуються зі швидкістю  $u$  в той бік, куди поширюється ХД. Згідно з оціночними розрахунками,  $u = D/4$ , де  $D$  – швидкість детонації [33].

Наявність у заряді порожнистої сферичної вставки, заповненої повітрям, формує повітряний проміжок. Коли під час детонації ділянки заряду довжиною, рівній його діаметру,  $t_1 = d/D$ , то за наявності всередині ВР порожнистої кулі:

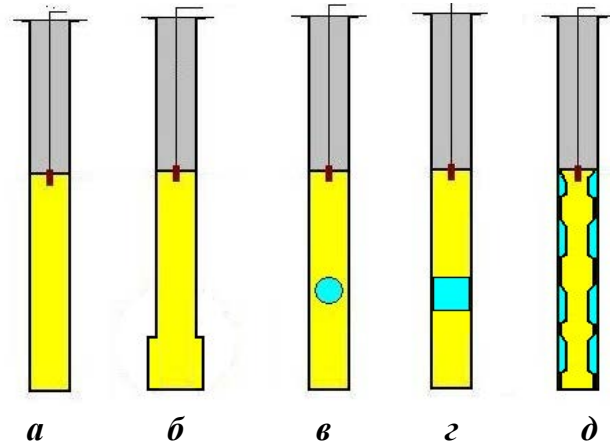
$$t_2 = \frac{d - d_{кул}}{D} + \frac{4d_{кул}}{D} = \frac{d + 3d_{кул}}{D}. \quad (6)$$

Порівнюючи  $t_1$  і  $t_2$ , зазначимо, що за наявності в ВР порожнистої кулі час дії вибуху на навколишнє середовище зростає зі збільшенням діаметра кулі незалежно від напрямку ініціювання цього заряду. При його ініціюванні з будь-якого з кінців на шляху детонації розташовується сферична вставка (куля), яка формує всередині ВР кумулятивні виїмки. При детонації по колонці такого заряду на внутрішній поверхні сферичної вставки по його осі фокусується газовий потік кумулятивного дії. Усередині сферичної порожнини має місце суттєве ущільнення продуктів детонації, зростання тиску в них, а також значне збільшення щільності енергії як у ПД, так і в УХ, що виникають під час вибуху, які сприяють підвищенню стійкості детонації по осі заряду.

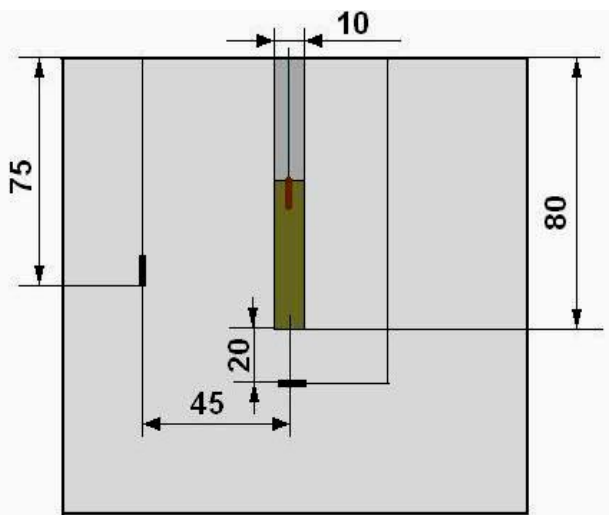
**2. Експериментальні дослідження руйнування твердого середовища зарядами ВР різних конструкцій.** Для вивчення й оцінки хвильової дії вибуху зарядів різних конструкцій у твердому середовищі в ІГТМ НАН України разом із Черкаським технологічним університетом МОН України розроблено спосіб моделювання вибухового руйнування гірських порід [34], згідно з основними положеннями якого підготовлена методика експериментальних досліджень.

Метою експериментальних досліджень було обґрунтування нової конструкції заряду змінного перерізу шляхом порівняння результатів їх руйнівної дії з зарядами інших конструкцій (рис. 1), а також чисельних показників амплітуди напружень у хвилі стискання під час вибуху однакових по масі зарядів ВР різних конструкцій.

Для проведення експериментальних досліджень виготовлені моделі кубічної форми з ребром 150 мм з піщаноцементної суміші, у яких при виготовленні за допомогою вставок по її осі на глибину 85 мм формувалися циліндричні порожнини діаметром 10 мм для розміщення в них зарядів ВР і встановлювалися п'єзоелектричні датчики на глибину 75 мм від верхньої межі моделі й на відстані від осі заряду 45 мм так, щоб площа поверхні датчиків була перпендикулярна напрямку хвилі стискання від вибуху зарядів ВР (рис. 2), а також у торці вибухової порожнини на відстані 20 мм уздовж її осі.



**Рис. 1. Конструкції зарядів ВР**  
а – заряд постійного перерізу; б – заряд із котловим розширенням у торці свердловини; в – заряд зі сферичною вставкою; г – заряд із повітряним проміжком; д – заряд змінного діаметра



**Рис. 2. Схема розташування в моделі п'єзодатчиків відносно заряду ВР**

Перед установкою в моделі п'єзодатчиків були заміряні електричні ємності круглих дисків, а потім з урахуванням того, що електрична ємність

пропорційна площі плоского конденсатора, розраховувалися електричні ємності п'єзодатчиків, установлених у моделях.

П'єзодатчики з кераміки ЦТС19, що встановлюються в моделях, являли собою квадранти дисків діаметром  $d = 14,8$  мм і товщиною  $h = 0,65$  мм. Площа кожного датчика ( $S_0$ ) дорівнює 1/4 площі диска і становила  $4,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ . Калібрування п'єзоелектричних датчиків здійснювалася методом резонансуантирезонансу, а потім розрахунковим шляхом визначався п'єзомодуль  $d_{33}$  кожного датчика [35].

Для оцінки фізикомеханічних властивостей руйнівного середовища одночасно з виготовленням основних моделей виготовлялися зразки для визначення щільності  $\rho$ , швидкості поздовжніх хвиль  $C_p$  і міцності на одновісне стискання матеріалу моделей відповідно до чинних Держстандартів [36–40].

Заряди ВР різних конструкцій (рис. 1) формувалися в підготовлених паперових патронах, внутрішній діаметр яких становив 0,95 діаметра зарядної порожнини. Заряди постійного перерізу формувалися в патронах циліндричної форми, а змінного діаметра з розширенням у торці – виго-

товлялися шляхом з'єднання однієї секції подовженого циліндричного патрона діаметром  $0,5d_{\text{свр}}$  із секцією патрона діаметром рівному  $0,95d_{\text{свр}}$  у його торці; розміщенням повітряного проміжку і сферичної вставки – кулі всередині заряду, а також формування колонки заряду змінного діаметра, що чергуються зі звуженими й розширеними ділянками.

Для формування по колонці заряду профілю змінного перерізу в нього рівномірно розміщували сферичні вставки – кулі. Сферичні вставки виготовляли з використанням спеціального пристрою, розробленого в ІГТМ НАН України [41].

Конструктивна особливість запропонованого пристрою для формування порожнин в термопластичних матеріалах, на відміну від відомих аналогів, полягає в тому, що ефективність і технічний результат досягаються за рахунок розміщення у вузлі формування порожнин – матриці, що складається з верхньої напівформи з нагрівальним елементом нового притискного модуля та його фіксованим положенням між листом із термопластичного матеріалу й нижньої нерухомої напівформи.

У підготовлених циліндричних зарядних порожнинах під час формування колонки подовжених зарядів використовували промислове ВР Комполайн масою 3,5 г або відрізки детонуючого шнура (далі – ДШ) для всіх серій експериментів. При цьому питома витрата ВР становила  $0,3 \text{ кг/м}^3$ . В якості набивки використовувався кварцовий річковий пісок фракції 0,25 мм. Підрив зарядів здійснювали відрізками ДШ довжиною 0,8 м, з'єднані в ланцюг із капсулемдетонатором або хвилеводом неелектричної системи ініціювання (далі – НСИ) типу NONEL, ПРИМА ЕРА або Імпульс і вибуховим пристроєм конденсаторним ПІВ100.

Руйнування моделей проводили в товстостінній металевій вибуховій камері, внутрішня поверхня якої футерована гумою. Зовнішній вигляд вибухової камери з розміщеною в ній моделлю до й після вибуху представлено на рис. 3. Під час вибуху зарядів ВР у моделях максимальні механічні напруження у хвилі стискання фіксуються, а далі перетворюються в електричні сигнали п'єзоелектричними датчиками, які у вигляді коду подають на цифровий осцилограф типу OWON серії POS 58225 (рис. 4), який має модуль пам'яті.

Перед вимірами проводять калібрування осцилографу й установлюють необхідну для цього експерименту його чутливість по амплітуді і три-



Рис. 3. Зовнішній вигляд вибухової камери (а) з моделлю (б) до вибуху і після вибуху (в)

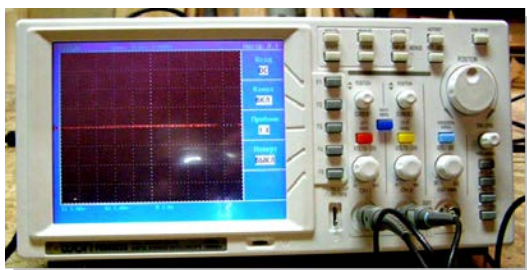


Рис. 4. Загальний вид вимірювального комплексу – цифровий осцилограф типу OWON, серія POS 58225



валості сигналу з урахуванням величини напружень, отриманих при пробних експериментальних вибухах. Амплітудне значення сигналу на осцилографі відповідає максимальному механічному напруженню у хвилі стискання. Отримана інформація кодується й передається на обчислювальний комплекс – NOTEBOOK (рис. 5), де з використанням програмного забезпечення (далі – ПЗ) обробляється й видається на монітор у діалоговому вікні у вигляді осцилограми з числовими даними по всьому діапазону вимірювань (рис. 6). За осцилограмами визначають максимальні величини електричних сигналів і тривалість імпульсу.

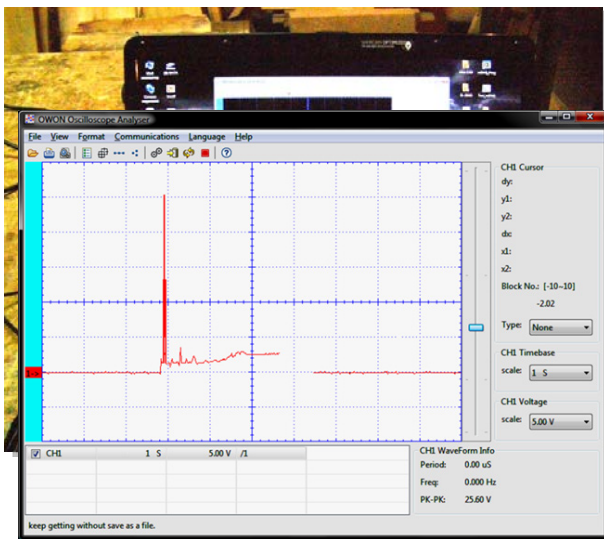


Рис. 6. Типові осцилограми амплітуди сигналів, записані за допомогою п'єзоелектричних перетворювачів

Експериментальні дослідження хвильової й руйнівної дії вибуху зарядів різних конструкцій на підготовлених піщаноцементних моделях, у яких

установлені п'єзоелектричні датчики, проводилися в полігонних умовах кар'єру «Сівач» КорсуньШевченківського РУ згідно з розробленою методикою.

Механічні напруження  $\sigma$  (Па) у моделях під час вибуху подовжених зарядів ВР, знятих із п'єзодатчиків показників електричної амплітуди сигналів  $U$  (В) з фіксуванням їх осцилографом, розраховувалися за формулою:

$$\sigma = \frac{CU}{d_{33}S_d}, \quad (7)$$

де  $C$  – електрична ємність п'єзодатчика (Ф),  $d_{33}$  – його п'єзомодуль (Кл/Н),  $S_d$  – площа поверхні датчика, (м<sup>2</sup>), нормально розміщеного в напрямку хвилі напружень під час вибуху заряду ВР,  $U$  – електрична амплітуда сигналів, В.

Параметри п'єзоелектричних датчиків та електричні амплітуди сигналів, які реєструються ними, наведено в таблиці 1.

У ході обробки результатів експериментів розраховувалися напруження у хвилі стискання на однаковій відстані від осі заряду, що дорівнює 9-ти радіусам  $r_0$  і в торці заряду рівному 4-йому радіусам  $r_0$  зарядної порожнини для різних конструкцій зарядів.

Результати випробувань щодо визначення фізикомеханічних властивостей матеріалу моделей наведено в таблиці 2.

Дослідження гранулометричного складу зруйнованих вибухом моделей проводили методом ситового аналізу за допомогою лабораторних сит типу СЛ200 № 58 та аналізатора ситового А30 за відомими методиками [42].

При обробці гранулометричного складу визначалася загальна маса зруйнованої вибухом частини

Таблиця 1

Параметри п'єзоелектричних датчиків

№ датчика в таблиці	Електрична ємність, $C \cdot 10^{-10}$ , пФ	Площа датчика, $S_d \cdot 10^{-5}$ , м <sup>2</sup>	П'єзомодуль $d_{33} \cdot 10^{-10}$ , Кл/Н	Електрична амплітуда сигналів $U$ , В	Чутливість осцилографа	
					за амплітудою, В/дел	за тривалістю, $\tau$ мкс/дел
7	7,82	4,3	3,04	182,5	20	50
9	7,65	4,3	2,77	153,0	20	50
11	7,65	4,3	2,77	78,6	20	50
15	8,12	4,3	3,01	89,1	20	50
18	7,87	4,3	3,01	101,8	10	50
21	7,85	4,3	2,87	164,7	20	50
28	7,85	4,3	2,9	460,0	20	50
41	0,164	8,6	3,13	460,0	20	50
41	0,164	8,6	3,13	400,0	20	50
42	0,164	8,6	3,03	400,0	20	50
42	8,22	4,3	3,03	420,0	20	50
42	8,22	4,3	3,03	340,0	20	50
43	0,152	8,6	2,93	245,0	20	50
43	0,152	8,6	2,93	560,0	20	50

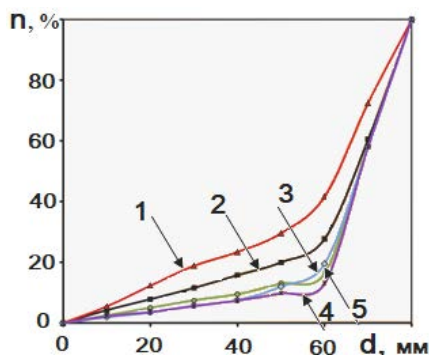
**Фізикомеханічні властивості матеріалу моделей**

Показники	Досліджувані параметри		
	щільність, кг/м <sup>3</sup>	швидкість подовжених хвиль, м/с	міцність на одновісне стискання, МПа
Середні значення	1840,0	2300,0	13,0
Середньоквадратичне відхилення $\Delta$ , кг/м <sup>3</sup>	44,0	49,0	0,006
Коефіцієнт варіації $V_{\text{вар}}$ , %	2,4	2,13	0,16

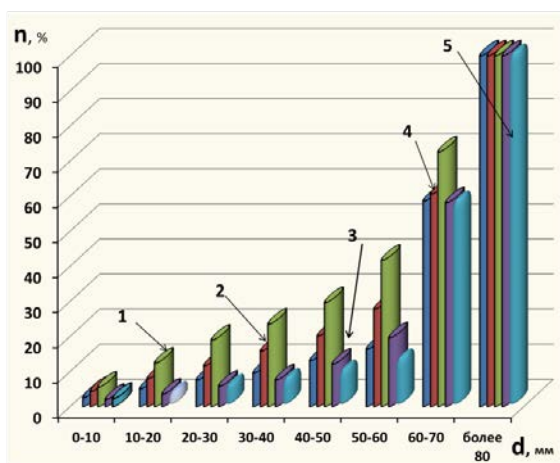
моделі, уміст дрібних фракцій, уміст великих фракцій і діаметр середнього куска. Результати обробки експериментальних даних наведено в таблиці 3.

За результатами ситового аналізу й обробки даних гранулометричного складу побудовано кумулятивні криві та гістограми, які наведено на рис. 7 і рис. 8.

Аналіз результатів експериментів показав, що під час вибуху зарядів змінного по висоті перерізу напруження у хвилі стискання вище, а загальна маса відбитих вибухом частини моделей більша, ніж при вибуху зарядів інших конструкцій: постійного перерізу, змінного діаметра по всій колонці заряду, з розширенням у торці й повітряним проміжком. Крім того, збільшується вихід як великих фракцій  $d > 50$  мм, так і діаметр середнього куска.



**Рис. 7.** Кумулятивні криві розподілу гранулометричного складу зруйнованих моделей зарядами ВР різних конструкцій: 1 – заряд ВР зі сферичною вставкою; 2 – заряд ВР із повітряним проміжком; 3 – заряд ВР із розширенням у торці шпура; 4 – заряд ВР суцільної конструкції; 5 – заряд ВР змінного діаметра по висоті колонки



**Рис. 8.** Гістограми розподілу гранулометричного складу зруйнованих моделей зарядами ВР різних конструкцій: 1 – заряд ВР зі сферичною вставкою; 2 – заряд ВР із повітряним проміжком; 3 – заряд ВР із розширенням у торці шпура; 4 – заряд ВР суцільної конструкції; 5 – заряд ВР змінного діаметра по висоті колонки

**Висновки.** У результаті дослідження отримано такі результати:

- теоретично досліджено механізм дії подовженого заряду ВР змінного перерізу. Аналіз розрахунків показав, що зменшення виділеної під час вибуху енергії відбувається за рахунок не тільки зменшення маси ВР, а й за рахунок зміни показників теплоти вибуху, причому використання сферичних вставок (куль) усередині ВР призводить до посилення дії ударної хвилі на середовище, що руйнується;

- встановлено, що в зарядах ВР змінного перерізу, у яких по його колонці рівномірно розміщені сферичні вставки діаметром рівним  $(0,50,8) d_{\text{зар}}$ , забезпечується стійкість детонації та змінюється механізм вибухового навантаження на середовище, що руйнується, за рахунок фокусування в центрі вставки потужного високотемпературного газового потоку кумулятивної дії;

- експериментально доведено, що зниження пікового тиску ПД на масив досягається за рахунок виходу високотемпературного газового потоку на контакт з проміжним середовищем – сферичною вставкою, яка заповнена повітрям. Наявність у порожнині повітря при високій температурі й тиску сприяє перетворенню форми вибухового імпульсу, зниженню їх пікових показників і збільшенню ефективності його впливу на масив гірських порід, що руйнується;

- експериментально встановлено, що під час вибуху зарядів змінного перерізу напруження у хвилі стискання вище, ніж напруження на тій же відстані для зарядів постійного перерізу. Доведено, що загальна маса відбитої частини моделі зарядами змінного перерізу більша, ніж під час вибуху зарядів інших конструкцій: постійного перерізу, змінного діаметра по всій колонці заряду, з розширенням в торці, з повітряним проміжком.



**Розрахункові й експериментальні результати вибухів зарядів ВР  
різних конструкцій у піщаноцементних моделях**

Конструкції зарядів	Напруження в хвилі стискання, $\sigma$ , ГПа		Маса відбитої вибухом моделі, г	Склад великих фракцій $d_i > 50$ мм	Діаметр середнього куску $d_{\text{ср}}$
	перпендикулярно напрямку хвилі стискання	у торці в напрямку осі заряду			
Заряд постійного перерізу	0,010	0,025	2470,0	1020,0	30,7
Заряд із повітряним проміжком	0,0098	0,025	3760,0	1330,0	33,0
Заряд зі сферичною вставкою	0,012	0,033	3480,0	1630,0	35,0
Заряд із розширенням в торці	0,0095	0,028	2600,0	1340,0	35,8
Заряд змінного діаметра	0,008	0,000148	1980,0	850,0	32,5

Установлено збільшення виходу великих фракцій  $d_i > 50$  мм і діаметра середнього шматка;

– отримані результати досліджень сприятимуть пошуку та розробці нових технічних

рішень щодо підвищення ефективності руйнування міцних гірських складної будови енергією вибуху на кар'єрах нерудних корисних копалин.

**Список літератури:**

1. Ефремов Э.И. Подготовка горной массы на карьерах. Москва : Недра, 1980. 272 с.
2. Опытнотпромышленные испытания технологии заряжания и эффективности взрывания необходимых горных пород зарядами переменного диаметра / Э.И. Ефремов, М.П. Белоконь, Е.В. Николенко и др. *Геотехническая механика* : межвед. сборник научн. тр. ИГТМ НАН Украины. Днепропетровск, 2005. № 58. С. 13–18.
3. Спосіб формування свердловинного заряду вибуховими речовинами руйнування тріщинуватих гірських порід: пат. на кор. модель 6518 Україна / Е.І. Єфремов, А.В. Пономарьов, В.В. Баранник, В.Г. Ковалевич, В.П. Мартиненко. № у 20040907557; заявлено 16.09. 2004; опубл. 16.05.2005. Бюл. № 5.
4. Сквaziнний заряд для уступной отбойки горных пород: АС на изобретение 112 6058 СССР / С.С. Яценко, Э.И. Ефремов, Б.Н. Кутузов, С.В. Олейник, В.В. Галкин, Ю.С. Яценко, И.Н. Усик. № 3554886/40 заявлено 21.02.1983. ДСП.
5. Демидюк Г.П. Применение энергетического принципа к расчету сквaziнных зарядов на карьерах. *Взрывное дело*. 1967. № 62/19. С. 36–51.
6. Ляшенко В.И., Андреев Б.Н., Куча П.М. Инновационные технологии подземной разработки сложноструктурных месторождений. *Горный журнал*. 2015. № 7. С. 9–18.
7. Гончаров С.А. Разрушение горных пород, пути повышения его эффективности. *Горный журнал*. 1996. № 5. С. 9–12.
8. Способ повышения коэффициента полезного действия сквaziнных зарядов при производстве взрывов на карьерах / С.А. Гончаров, Г.Г. Каркашадзе, В.И. Мочалов, А.И. Дремин и др. *Горный журнал*. 1994. № 3 С. 32–33.
9. Ефремов Э.И., Мартыненко В.П., Бережецкий А.Я. Выбор средств и методов повышения эффективности взрывных работ на карьерах. *Развитие методов добычи руд черных металлов и пути их дальнейшего совершенствования* : материалы Междунар. научнотехн. конф. (Кривой Рог, 22–23 мая 2003 г.) / Мво промышленной политики Украины, ГНИГРИ. Кривой Рог : ГНИГРИ, 2003. С. 148–154.
10. Спосіб руйнування тріщинуватих гірських порід вибуховими речовинами: пат. на кор. модель 37722 А Україна / Е.І. Єфремов, В.Д. Петренко, М.П. Білоконь, І.Л. Коваленко, В.П. Мартиненко, К.В. Лотоус, А.С. Сторчак, Г.К. Биков, М.Ф. Кучма. № у 20001990; заявлено 07.04. 2000; опубл. 15.05.2001. Бюл. № 10.
11. Опыт взрывания сквaziнных зарядов переменного диаметра по высоте уступа / М.П. Белоконь, Е.В. Николенко, К.В. Яицков и др. *Вісник Кременчуцького держ. політехн. унту*. Кременчук, 2006. Вип. 6 (41). Част. 1. С. 56–60.

12. Комир В.М., Сокурено В.А., Ромашко А.М. Эффективность различных конструкций зарядов при взрывной отбойке известняков на карьерах. *Науковий вісник НГУ. Дніпропетровськ*, 2005. № 10. С. 7–10.
13. Друкований М.Ф., Ефремов Э.И., Ильин В.И. Буровзрывные работы на карьерах. Москва : Недра, 1978. 390 с.
14. Способ дробления трещиноватых и слоистых горных пород скважинными зарядами и устройство для его осуществления: АС на изобретение 786423 СССР / Э.И. Ефремов, В.Д. Петренко, И.Л. Кратковской, Н.П. Рева, И.Ф. Гончар, В.М. Кузнецов, А.В. Шацкевич. № 2789613/2203. заявлено 03.07.1979. ДСП.
15. Ефремов Э.И., Никифорова В.А., Ищенко К.С. Способы отбойки горных пород удлиненными зарядами переменного сечения. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва* : науково-виробничий збірник. Кременчук, 2008. Вип. 1. № 1. С. 7–11.
16. Шкуматов А.Н., Калякин С.А. Перераспределение импульса взрыва при помощи рефракторов. *Взрывное дело*. 2007. № 98/55. С. 120–128.
17. Мучник С.В. Применение элементов линейного инициирования при турбовзрывании для вывода подошвы уступа на проектную отметку. *ФТПРПИ*. 2012. № 1. С. 68–75.
18. Денисов Ю.Н. Газодинамика детонационных структур. Москва : Машиностроение, 1989. 561 с.
19. Обоснование параметров скважинного заряда взрывчатого вещества с воздушным промежутком и отражателем из сыпучих материалов / С.В. Тищенко, П.И. Федоренко, Г.И. Еременко и др. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. Днепропетровск, 2015. № 2. С. 90–93.
20. Рахманов Р.А. Обоснование параметров комбинированной конструкции скважинного заряда для разнопрочного горного мас сива. *Горный информационноаналитический бюллетень*. Москва : Издво Горная книга, 2013. № 8. С. 207–209.
21. Ефремов Э.И., Никифорова В.А., Ромашко А.М. Влияние конструкции скважинного заряда ВВ на изменение условий передачи энергии взрыва разрушаемой породе. *Взрывное дело*. 2012. № 10865. С. 157–173.
22. Ефремов Э.И., Никифорова В.А., Ромашко А.М. О механизме разрушения горных пород цилиндрическими зарядами с кольцевыми инертными зазорами. *Вісник Кременчуцького національного університету*. Кременчук : КрНУ, 2012. Вип. 1 (72). С. 127–130.
23. Zare S., Bruland A. Progress of drill and blast tunnelling efficiency with relation to excavation time and costs. *Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises*. London ; United Kingdom : Taylor & Francis Group, 2007.
24. Andrievsky A.P., Akhpashev B.A. Improvement of rock fragmentation by distributed charge blasting. *Journal of Mining Science*. 2017. № 53. P. 253–258. URL: <https://doi.org/10.1134/S1062739117022080>.
25. Mertuszka P., Szumny M., Fulawka K., Nikolov S. Field evaluation of mine blasting efficiency. *SWS Journal of Earth and Planetary Sciences*. 2020. № 2. P. 1–16. URL: <https://doi.org/10.35603/eps2020/issue2.01>.
26. Mihaela Todaras. Optimization study of blasting operations in Roşia Poieni open pit mine, Romania. *Mining of Mineral Deposits*. 2021. Volume 15. Issue 4. P. 43–55. URL: <https://doi.org/10.33271/mining15.04.043>.
27. Опытнотомышленные испытания технологии заряжания и эффективности взрывания необводненных горных пород зарядами переменного диаметра / Э.И. Ефремов, М.П. Белоконь, Е.В. Николенко и др. *Геотехническая механика* : межвед. сборник научн. трудов / ИГТМ НАН Украины. Днепропетровск, 2005. № 58. С. 13–18.
28. Шевкун Е.Б., Лещинский А.В., Галимьянов А.А. Управление буровзрывным дроблением скальных пород зарядами с воздушными полостями. *Горный журнал*. 2016. № 2. С. 39–42.
29. Требования к выбору параметров БВР для дробления сложноструктурных массивов горных пород комбинированными и дополнительными зарядами / А.В. Дугарцыренов, С.И. Ким, Е.Л. Бельченко и др. *Взрывное дело*. 2015. № 113/70. С. 142–148.
30. Интенсификация разрушения массива разнопрочных горных пород зарядами ВВ с кумулятивным эффектом / Ю.Д. Норов, Ж.В. Бунин, Г.С. Нуфтуллаев и др. *Горный журнал*. 2016. № 2. С. 32–34.
31. Спосіб формування свердловинного заряду кумулятивної дії для вибухового руйнування гірських порід: пат. на винахід 86138 Україна / А.Ф. Булат, К.С. Іщенко, В.П. Джос, В.Я. Осінній, Н.І. Лисиця, О.К. Іщенко, В.М. Коновал. № а 200708501; заявлено 24.07.2007; опубл. 25.03.2009. Бюл. № 6.
32. Дубнов Л.В., Бахаревич Н.С., Романов А.И. Промышленные взрывчатые вещества. Москва : Недра, 1988. 360 с.
33. Покровский Г.И. Взрыв. Москва : Недра, 1980. 190 с.
34. Спосіб моделювання вибухового руйнування гірських порід: пат. на винахід 110745 Україна / К.С. Іщенко, С.В. Коновал, І.Л. Кратковський, В.В. Круковська, В.М. Коновал. № а 201408761; заявлено 04.08.2014; опубл. 10.02.2016. Бюл. № 3.
35. Глозман И.А. Пьезоэлектрические материалы в электронной технике. МоскваЛенинград : Энергия, 1965. 192с.

36. ГОСТ 21153.0–75. Породы горные. Отбор проб и общие методы физических испытаний. Введен с 01.07.1975. Москва : Издво стандартов, 1976. 20 с.
37. ГОСТ 10181.2–81. Смеси бетонные. Методы определения плотности. Введен с 01.01.1981. Москва : Издво стандартов, 1981. 25 с.
38. ГОСТ 21153.2–84. Породы горные. Метод определения предела прочности при одноосном сжатии. Введен с 01.07.1986. Москва : Издво стандартов, 1986. 10 с.
39. Временные методические указания по экспрессопределению упругих свойств горных пород ультразвуковым методом на необработанных образцах керна геологоразведочных скважин РД / А.А. Яланский, Т.А. Паламарчук, С.И. Скипочка и др. Ленинград : ВНИМИ, 1987. 41 с.
40. ГОСТ 21153.7–75. Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн. Введен с 01.01.1975. Москва : Издво стандартов, 1976. 35 с.
41. Пристрій для формування порожнин в термопластичних матеріалах: пат. на кор. модель 109447 Україна / К.С. Іщенко. № u 201601846; заявлено 26.02.2016; опубл. 25.08.2016. Бюл. № 16.
42. Барон Л.И. Кусковатость и методы ее измерения. Москва : Издво АН СССР, 1960. 124 с.

### **Konoval V.M., Ishchenko K.S. THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCHES OF DIFFERENT-GRADE EXPLOSIVE LOAD OF SOLID ENVIRONMENT ON CHARGE LENGTH OF VARIABLE CHARGE CROSS SECTION**

*The mechanism of action of the extended charge of explosives of variable section is theoretically revealed in research. The calculations showed that the reduction of energy released during the explosion is not only due to the reduction of the mass of explosives, but also due to changes in the heat of the explosion. Moreover, the use of spherical inserts (balls) inside the explosive leads to increased impact of the shock wave and the creation of a gradient load, which increases the tensile stresses on the collapsing medium. In order to substantiate the new design of charge of variable cross section, experimental studies were conducted on structurally homogeneous sand-cement models by comparing the results of their destructive action with charges of other structures, as well as numerical indicators of stress amplitude in compression waves during explosion. To do this, in the laboratory were made models of cubic shape with an edge of 150 mm of sand-cement dough in a ratio of 1: 1 with the addition of 0.5% water. To close the mixture used cement grade M 500. During the manufacture of models in metal form with inserts along its axis to a depth of 85 mm formed cylindrical cavities with a diameter of 10 mm to accommodate explosive charges, also 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, and at the end - at a distance of 20 mm along its axis. They were placed in the model so that the surface plane of the sensors were perpendicular to the direction of the compression wave from the explosion of explosive charges. Evaluation of physical and mechanical properties of the destructive medium to determine the density  $\rho$ , velocity of longitudinal waves  $W_{ed}$  and the strength of uniaxial compression of the model material was performed on cubic models with a rib size of  $40 \pm 2$  mm in accordance with current State Standards. They were made simultaneously with the manufacture of basic models. 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 explosive in the destruction of models used industrial explosive Compoline weighing 3.5 g or pieces of detonating cord (DC) for all series of experiments. The charges were detonated by DC 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 and an explosive device capacitor PIV100. The experiments were conducted in the field conditions of the Sivach quarry of the Mine Management Korsun-Shevchenkivsky region. The destruction products were separated into fractions by sieve analysis, according to which the dependences of the particle size distribution were constructed. The results of experiments showed that the reduction of the peak pressure of detonation products (DP) on the array is achieved due to the output of high-temperature gas flow in contact with the intermediate medium – a spherical insert, which is filled with air.*

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