

COMPUTER SCIENCE

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ МОНІТОРИНГ ВИБОРУ І ОБҐРУНТУВАННЯ ФОРМИ ЗАРЯДУ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО ВИБУХОВОГО РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД У КАР'ЄРАХ

Коновал В.М.

*Кандидат технічних наук, доцент, каф. промислового та цивільного будівництва Черкаського державного технологічного університету, Україна
ORCID.org/0000-0002-6740-6617*

Голуб С.В.

*Доктор технічних наук, професор каф. програмного забезпечення автоматизованих систем Черкаського державного технологічного університету, Україна
ORCID.org/0000-0002-5523-6120*

INTELLECTUAL MONITORING OF CHARGE FORM CHOICE AND JUSTIFICATION FOR EFFECTIVE EXPLOSIVE BREAKDOWN DESTRUCTION IN QUARRIES

Konovall V.

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor kaf. Industrial and civil construction
Cherkassy State Technological University, Ukraine
ORCID.org/0000-0002-6740-6617*

Holub S.

*Doctor of Technical Sciences, Professor, kaf. Software for automated systems
Cherkassy State Technological University, Ukraine
ORCID.org/0000-0002-5523-6120*

Анотація

В статті наведено результати моделювання дроблення твердого середовища зарядами вибухових речовин різної форми перерізу за різними умовами їх динамічного навантаження. За результатами руйнування твердого середовища виконано обґрунтування раціональної форми заряду шляхом прогнозування розподілу гранулометричного складу зруйнованих моделей за різними умовами їх динамічного навантаження з використанням технології інтелектуального моніторингу результатів руйнування твердого середовища. Для отримання інформації із масиву чисельних характеристик результатів спостережень побудовано моделі за багаторядним алгоритмом МГУА.

Abstract

The article presents the results of modeling the crushing of solid media by charges of explosives of different cross-sectional shapes under different conditions of their dynamic loading. Based on the results of solid medium destruction, the rational form of charge is substantiated by predicting the distribution of particle size distribution of destroyed models under different conditions of their dynamic loading using the technology of intelligent monitoring of solid medium destruction results. To obtain information from the array of numerical characteristics of the results of observations, models were built according to the multi-row algorithm of GMDH.

Ключові слова: модель, заряд вибухової речовини, вибух, гранулометричний склад, інтелектуальний моніторинг, МГУА.

Keywords: model, explosive charge, explosion, particle size distribution, intelligent monitoring, GMDH.

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 буропідривні роботи (БПР). 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 терміну 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 підривання (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 (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 виді 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 повітряними проміжками [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 ефективнішого використання енергії вибуху при руйнуванні гірських порід є застосування свердловинних зарядів, розосереджених повітряними проміжками [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 зменшенні 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 контакт 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 шлему, 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 замикання заряду ВР у середовищі, що руйнується. Для свердловинних зарядів, що мають вихід на денну поверхню, зі збільшенням діаметра заряду різко погіршується замикання їх набивкою, внаслідок чого знижується коефіцієнт корисної дії енергії вибуху. Це призводить до погіршення якості вибухового дроблення та опрацювання підосви 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 залізородних та флюсових кар'єрів України.

Свердловинні заряди змінного діаметру формувались за допомогою поліетиленових рукавів, діаметр різних ділянок яких становив 180 та 250 мм. 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 перездрібнених 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.

Мета та постановка завдання досліджень. Метою роботи є проведення індуктивного моделювання під час процесу інтелектуального моніторингу результатів експериментальних досліджень по вибору і обґрунтуванню конструкції подовженого заряду ВР різної форми поперечного перерізу з подальшим прогнозуванням якості гранулометричного складу зруйнованого вибухом твердого середовища. Для досягнення мети буде проведено комплексні дослідження на підготовлених структурно-однорідних піщано-цементних моделях кубічної

форми по оцінці характеру руйнування твердого середовища під дією вибуху зарядів ВР різної форми поперечного перерізу та за різними умовами передачі енергії вибуху. За результатами дроблення моделей і отриманої інформації із масиву чисельних характеристик результатів спостережень будуть побудовані моделі за багаторядним алгоритмом МГУА, які відобразять залежності цільового показника від ознак, що характеризують умови та результати проведених вибухів. Перелік ознак та кількість спостережень визначено експертним шляхом.

Виклад основних результатів. Прогнозування розподілу гранулометричного складу продуктів руйнування отримало широке поширення при вирішенні практичних завдань видобутку, транспортування і переробки корисних копалин [19]. Воно базується на принципах математичного моделювання, тобто вивчення за допомогою математичних моделей явищ, процесів і їх результатів. При цьому метод математичного моделювання все більше застосовується для прогнозування й оцінки ймовірності отримання виходу кондиційних кусків (фракцій) певних класів у відбитій гірничій масі чи їх усереднених показників при веденні БПР, механічному руйнуванні та подальшому їх подрібненню і переробці.

Щоб прогнозувати вихід фракцій, який отримано після вибуху залежно від конструкції заряду ВР було проведено моделювання за одним із індуктивних методів – методом групового урахування аргументів [20]. Перелік впливових факторів та їх ознак був визначений експертним шляхом.

Процес моделювання з метою прогнозування і керування гранулометричним складом продуктів руйнування, виходячи з основних уявлень математики, можна розділити на три етапи [21].

Перший етап – побудова моделей, що взаємопов'язують основні розмірні (чи безрозмірні) параметри шматків із фізичними чи статичними параметрами процесу.

Другий – дослідження й аналіз поліноміальної моделі з метою отримання вихідних даних за розміром шматка для подальшого їх порівняння з результатами процесів, що вивчаються на практиці.

Третій етап з'ясовує, чи задовольняє прийнята гіпотетична модель обраному критерію, тобто чи узгоджуються результати практичних спостережень гранулометрії з результатами моделювання із прийнятною точністю спостережень.

Якість руйнування гірських порід вибухом визначається значною кількістю пов'язаних між собою факторів, рівні яких істотно варіюють [22]. Вона залежить, як від головних факторів, обумовлюючих фізичні закономірності утворення кусків, так і другорядних факторів – випадкових, що характеризують відхилення від цих закономірностей,

які визначають статистичний характер процесу руйнування гірських порід вибухом.

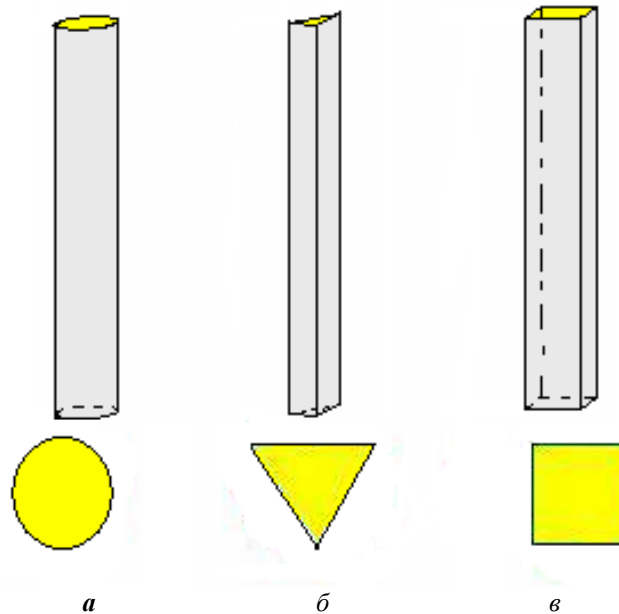
Для організації спостережень за результатами вибухових робіт у кар'єрах нерудних корисних копалин експертним шляхом був визначений перелік основних умов: фізико-механічні властивості порід, їх тріщинуватість різних рівнів, тип ВР, параметри розташування зарядів ВР у масиві і кінцеві результати вибуху. Згідно наведених умов побудуємо модель для прогнозування розподілу гранулометричного складу підірваної гірської маси.

Для обґрунтування та подальшого прогнозування гранулометричного складу продуктів руйнування твердого середовища і порівняння їх з результатами вибуху на уступі кар'єру в залежності від конструкції заряду ВР і умов передачі енергії вибуху було проведено 6 серій експериментальних досліджень на моделях в полігонних умовах кар'єру «Сівач» Корсунь-Шевченківського РУ згідно розробленої методики досліджень [23].

Моделі для досліджень виготовлювались із піщано-цементної суміші з додаванням води при їхньому співвідношенні 1:1:0,5. Для виготовлення однієї частки моделей заповнювачем служив мілкий річковий пісок, а затворювачем – цемент марки М400. Інша частка моделей виготовлювалась із заповнювача – мілкий річковий пісок + гранітний відсів діаметром фракцій 5-10 мм і затворювача – цемент марки М400 + вода при співвідношенні компонентів 1:1:1:0,5.

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 діаметром 16 мм на глибину 80 мм. Після отримання 30 % міцності моделей їх виймали з форми і витримували на повітрі до набрання максимальної міцності згідно діючих Держстандартів. Для експериментів було виготовлено 18 моделей по 3 шт. для кожної серії експериментів + одна для пробного вибуху [24]. Разом з виготовленням основних моделей виготовлялись зразки для оцінки фізико-механічних властивостей середовища, що руйнується згідно діючих Держстандартів.

Для руйнування підготовлених моделей і проведення 6-ти серій експериментальних досліджень виготовлювали конструкції заряду ВР різної форми у вигляді гільзи із картону трикутної, квадратної форми і у вигляді кола в перерізу. В підготовлені гільзи розміщували вибухову речовину «Комплайт ГС-6» вагою 2г з ініціатором – капсулом-детонатором, з'єднаною з неелектричною системою ініціювання (НСІ) «Імпульс». Зовнішній вигляд зарядів наведено на рис. 1



*а – заряд постійного перерізу; б – заряд в перерізу у формі трикутної призми;
в – заряд в перерізу у формі квадратної призми;*
Рис. 2. Конструкції зарядів ВР різної форми перерізу для підривання моделей

Сформовані конструкції зарядів ВР розміщували в зарядній порожнині моделей з різними фізико-механічними властивостями і умовами передачі енергії вибуху руйнівочому середовищу. Ці умови були наступними.

Простір навколо гільз зарядів трикутної і квадратної форми заповнювали піском, водою і залишали зазор з повітряним проміжком, а круглої форми безпосередньо в контакт з поверхнею зарядної порожнини. Підготовлені моделі розташовували в вибуховій камері внутрішня поверхня якої футерована вакуумною гумою і підривали. Підривання зарядів здійснювалось вибуховим приладом конденсаторним типу ПІВ 100.

Зруйновану модель із камери струшують в ємність і далі в лабораторних умовах проводять дослідження гранулометричного складу зруйнованих вибухом моделей методом ситового аналізу за відомими методиками [25] з використанням набору лабораторних сит типу СЛ-200 №58 та аналізатору ситового А30.

На основі отриманого розподілу гранулометричного складу зруйнованих вибухом моделей був сформований масив вхідних даних для індуктивного моделювання із застосуванням методу групового урахування аргументів (МГУА).

МГУА використано як метод побудови індуктивної моделі та відображенні у її структурі властивостей досліджуваного об'єкту. При організації спостережень за об'єктом експертним шляхом формується словник ознак – перелік показників, які, як вважають експерти, виключно характеризують стан об'єкта. Часто до словника ознак заносяться ті показники, які вже використовуються у визначених методиках і вже довели свою інформативність. Експертним шляхом визначається також перелік стану об'єкту та кількість спостережень об'єкту у кожному стані. Після проведення спостережень інформація про об'єкт відображена у масиві результатів

– чисельними значеннями ознак об'єкту у різних його станах, який отримав назву первинного опису (ПО). ПО має форму двовимірної таблиці, яку утворюють вектори чисельних значень результатів спостережень – показників словника ознак. Назва стовпчиків є іменами ознак. Кожен вектор є точкою спостереження у багатовимірному просторі ознак [26].

Наступним етапом перетворення цієї інформації є відображення її у структурі моделі. Відображення властивостей об'єкта відбувається у процесі застосування алгоритму синтезу моделі (АСМ) [26]. За методом, на якому будується АСМ, визначають тип моделювання – математичне, статистичне, імітаційне, індуктивне та багато інших. Метод групового урахування аргументів (МГУА) [27] – це метод глибинного навчання, що використовується для індуктивної побудови ієрархії, як правило, поліноміальних моделей, за ПО, поданого у формі двовимірної таблиці. За допомогою цього методу виявляється та аналітично подається залежність однієї із ознак масиву результатів спостережень від інших ознак цього масиву [28].

Алгоритми МГУА реалізують процес масової селекції моделей за наперед заданими критеріями якості. Початкова популяція моделей генерується у формі комбінацій однієї, двох та більше ознак об'єкта або процесу, за якими відбувались спостереження. Таким чином словник ознак надає змінні, за якими будуються опорні форми моделей, або опорні моделі. Вид опорних форм визначає структуру остаточної моделі оптимальної складності, які є результатом роботи АСМ МГУА.

Згідно із теоремою Стоуна-Веєрштрасса [29] неперервну на скінченному інтервалі функцію можна подати з достатньою точністю у вигляді полінома певного ступеня. Тому МГУА використовує поліноми як форму опорної моделі.

Опорні форми моделей будуються на основі дискретного аналогу ряду Вольтерри – ряду Вінера [30]:

$$\begin{aligned}
 Y(x_1, x_2, \dots, x_n) = & a_0 \\
 & + \sum_{i=1}^n a_i x_i \\
 & + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j \\
 & + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{ijk} x_i x_j x_k \\
 & + \dots
 \end{aligned} \quad (1)$$

Опорні моделі є ненавченими, оскільки для кожної точки спостереження значення змінних у них відомі із ПО, а значення постійних коефіцієнтів при цих змінних є невідомими. Навчити модель означає визначити значення коефіцієнтів при змінних моделі. МГУА має кілька десятків процедур навчання моделей, тобто кілька АСМ МГУА [27]. Серед найпоширеніших – багаторядний та комбінаторний АСМ МГУА.

Вперше процедуру навчання моделі, побудованої за формою ряду Вінера (1), шляхом підлаштування значень коефіцієнтів “ a ” до динаміки часового ряду, застосував Д. Габор для передбачення майбутнього значення ознаки за її історичними значеннями [31]. Цей метод синтезу прогнозних моделей отримав назву «Передбачаючий фільтр». Цей підхід був використаний О.Г. Івахненком для навчання моделей при створенні МГУА [32]. Опорною формою прогноуючого фільтра використано окремий випадок ряду Вінера (1), поліном Колмогорова-Габора 2 ступеня (2):

$$\begin{aligned}
 y = & a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_1 x_2 + \\
 & a_4 x_1^2 + a_5 x_2^2 + a_6 x_1^2 x_2 + a_7 x_1 x_2^2 + \\
 & a_8 x_1^2 x_2^2,
 \end{aligned} \quad (2)$$

де $x_1 x_2$ – комбінація поєднань змінних із словника ознак.

У цій роботі використовувався багаторядний АСМ МГУА [27]. ПО розбивається на 2 послідовності точок спостереження. Послідовність « A » використовується для навчання моделей, послідовність точок « B » – для випробування цих моделей. Використовуючи опорні форми, генерується перший ряд моделей для селекції. Структура кожної моделі (перелік змінних та послідовність арифметичних дій над ними) задається опорною формою. Змінні відбираються із словника ознак. Число всіх комбінацій змінних визначає, скільки моделей буде згенеровано для побудови ряду селекції.

Після побудови ряду селекції ми отримуємо множину ненавчених моделей. Для навчання кожної моделі використовується послідовність дій, описана в [31]. Використовуючи послідовність точок спостереження « A », формується система умовних рівнянь, застосовується нормалізація, система

нормальних рівнянь розв’язується одним із стандартних методів (наприклад за методом Зейделя), розв’язки системи нормальних рівнянь дають значення коефіцієнтів при змінних для заданої моделі. Таким чином процес навчання моделі завершений.

Після цього кожна модель випробується на послідовності точок « B ». За результатами випробувань розраховується критерій якості моделі. Існує кілька критеріїв якості моделі [27]. В залежності від завдання, яке виконує модель, та інформативності результатів спостережень ПО підбирається найбільш адекватний критерій якості. Наприклад, критерій регулярності розраховується як середнє квадратичне відхилення (СКВ) результатів моделювання від дійсних значень модельованого показника у ПО на послідовності точок спостереження « B ». Результатом випробування моделі є значення критерію її якості. За цим критерієм моделі ранжуються. Ранг 1 присвоюється моделі із «найкращим» значенням критерію якості (у випадку із критерієм регулярності найкраще – це найменше значення СКВ). Таким чином відбулась побудова множини моделей, як ідентифікують функціональну залежність:

$$\begin{aligned}
 Y = & f(X), \\
 Y = & \{y_1, y_2, \dots, y_m\}, \\
 X = & \{x_1, x_2, \dots, x_n\},
 \end{aligned} \quad (3)$$

де m – число моделей, що утворюють ряд селекції; n – число змінних у словнику ознак.

Наступним етапом багаторядного алгоритму МГУА є відбір моделей для генерації вищого ряду селекції моделей. Відбирається задане число моделей, найвищих за рангом, та перевіряється критерій зупинки процесу генерації вищого ряду селекції. Існує кілька критеріїв зупинки селекції. Використовуються характеристики моделі, яка має ранг «1», або характеристики множини моделей, які утворюють весь ряд селекції. Процес селекції зупиняється, якщо характеристики моделей вищого ряду селекції є гіршими за характеристики моделей попереднього ряду. Значення критерію зупинки селекції починають контролювати, починаючи з другого ряду.

Якщо селекція моделей не зупинена, відбувається генерація моделей наступного ряду. Процес такий же як і генерація моделей першого ряду, із тією відмінністю, що у якості змінних виступають вже «кращі» моделі попереднього ряду:

$$\begin{aligned}
 Z = & f(Y), \\
 Z = & \{z_1, z_2, \dots, z_k\}, \\
 Y = & \{y_1, y_2, \dots, y_l\},
 \end{aligned} \quad (4)$$

де k – число моделей наступного ряду; l – число кращих моделей попереднього ряду.

Після спрацювання критерію зупинки селекції, АСМ повертається на попередній ряд, вибирає модель із рангом «1», конструює її, виражаючи через змінні словника ознак множини “ X ”. Модель готова для використання.

За допомогою багаторядного АСМ МГУА було проведено дослідження по розв’язанню задачі

функціональної залежності виходу гранулометричного складу зруйнованої вибухом цементно-піщаних моделей від конструкції і форми заряду ВР та побудовано математичну модель процесу руйнування. По результатам моделювання, які отримані в кожній точці моделювання (певна комбінація факторів) побудовані залежності оригінальних значень

розподілу гранулометричного складу зруйнованих вибухом цементно-піщаних моделей в порівнянні з прогностичними оцінками виходу різних фракцій та динаміку показників у досліджуваному діапазоні (рис. 2-5).

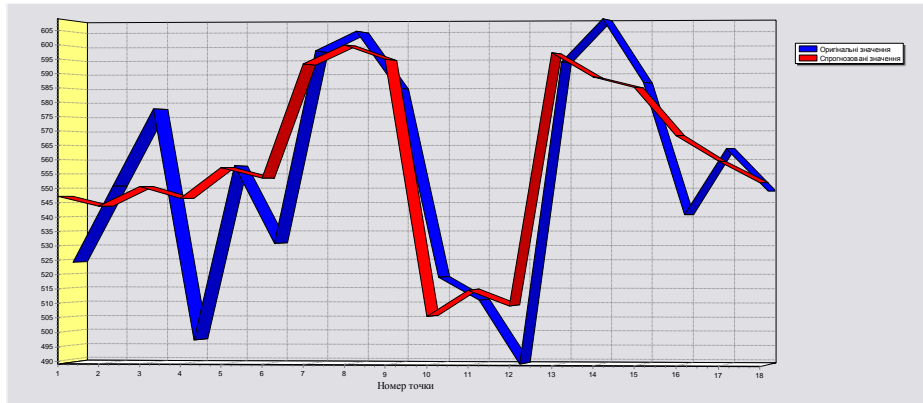


Рис. 2. Вихід фракції 0–5 мм

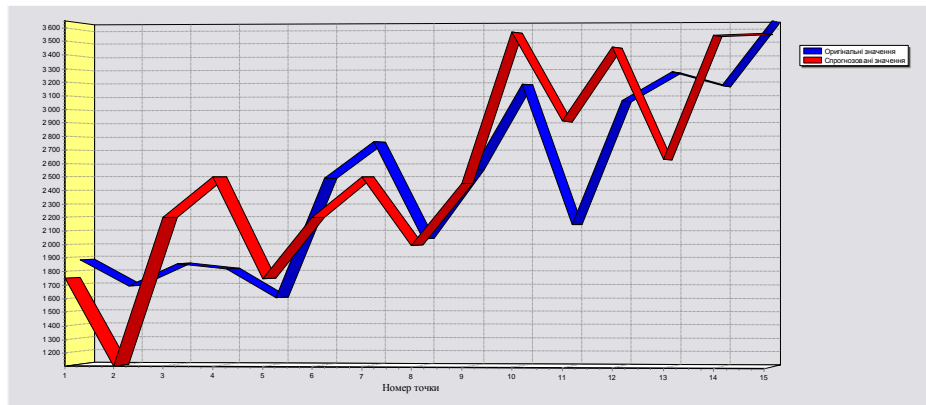


Рис. 3. Вихід фракції 5–20 мм

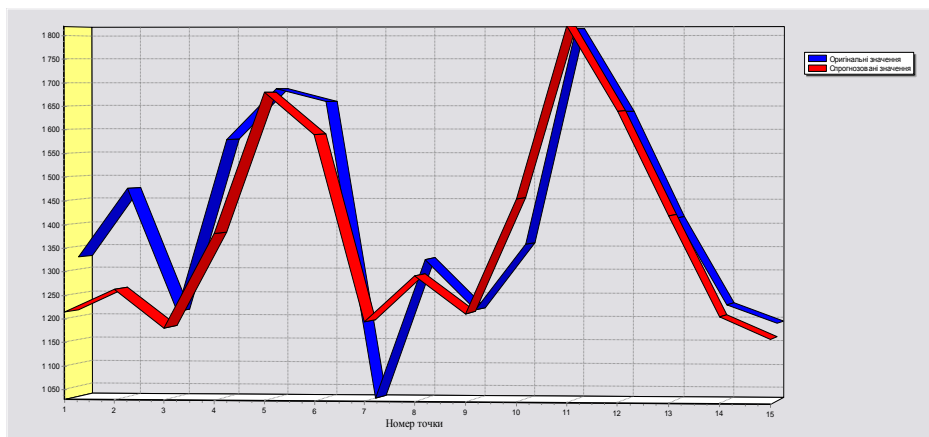


Рис. 4. Вихід фракції 20–40 мм

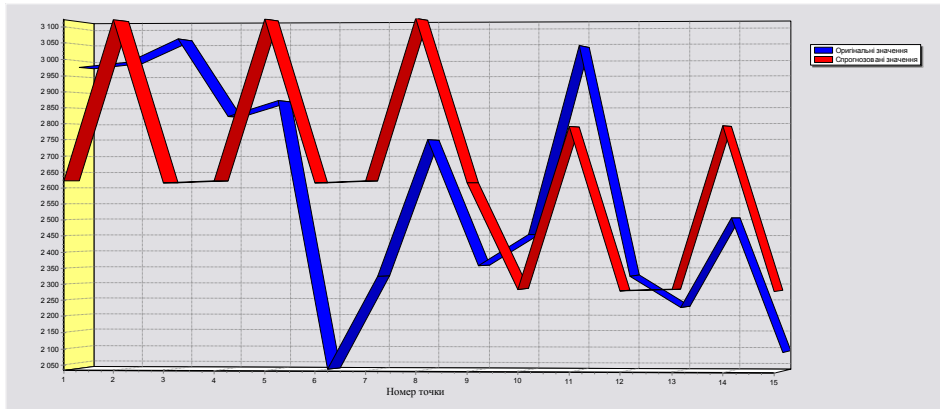


Рис.5. Вихід фракції 40–70 мм

Висновки. Для проведення експериментів в полігонних умовах використано розроблену методику дослідження на моделях, яка складається з етапів підготовки твердого середовища і руйнування його енергією вибуху зарядами ВР різної форми перерізу. На основі отриманих статистичних даних розподілу гранулометричного складу зруйнованого вибухом твердого середовища з подальшим його прогнозуванням побудовано за допомогою багаторядного алгоритму МГУА математичну модель процесу руйнування. На основі побудованих залежностей виконано порівняння результатів індуктивного моделювання та результатів натурних експериментів у полігонних умовах на моделях і підтверджено їх задовільну збіжність, яка не перевищила 5-6 %.

За результатами моделювання встановлено, що інтенсивність руйнування моделей при постійній масі заряду ВР залежить від її форми перерізу та умов передачі енергії вибуху через проміжне середовище – повітря, вода, пісок, яким заповнено простір між поверхнею колонки заряду та поверхнею зарядної порожнини.

Застосування технології формування свердловинних зарядів із регульованою енергією вибуху шляхом зміни площі контакту ВР зі стінками свердловин, що передається породі через одиницю бічної поверхні заряду, зумовлює формуванню в цій зоні різноградієнтних здвигових і напруження розтягання зі зміщенням їх у часі і просторі, що забезпечує рівномірності дроблення породи, зниження об'єму перездрібнених фракцій і витрат на вибухові матеріали та сприяє отриманню реального економічного ефекту при розробці нерудних корисних копалин України.

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. Булат А.Ф., Никифорова В.А., Осенний В.Я. Повышение эффективности буровзрывных работ в крепких рудах / Весник Кременчугского гос. политехн. ун-та. 2006 (37). Вып. 2. Част.2. С.93-94.
6. Билоконь В.П., Ильин В.И., Белоконь М.П. и др. Эффективность отбойки горных пород системой сосредоточенных зарядов / Металлургическая 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 Кременчугського 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.Й., Еременко Г.И. [и др.]. Обоснование параметров скважинного заряда взрывчатого вещества с воздушным промежутком и отражателем из сыпучих материалов / Металлургическая 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 на размеры зоны перемеления при разрушении твердых сред / Научный вестник 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 Кременчуцького національного університету. Кременчук: КрНУ, 2012. Вип. 1/2012(72). С. 127-130.
19. Ефремов Е.И., Петренко В.Д. и Пастухов А.И. Прогнозирование дробления горных пород взрывом. К.:Наук. думка,1990.118с.
20. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. К. : Наук. думка, 1981. 296 с.
21. Турчин, В.М. Математика. К.: Академия, 1999. 218 с.
22. Гуменик О.П. Стрілець, В.Ю. Швець І.Л. Визначення оптимальних параметрів сейсмобезпечного виконання буропідричних робіт на Піщанському родовищі мігматитів і гранітів / Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. Кременчук: КрНУ, 2012. Випуск 2(10). 112-120 с.
23. 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.
24. Коновал В.М. Оцінка характеру руйнування твердого середовища зарядами ВР змінної форми поперечного перерізу за різними умовами передачі енергії вибуху / Вчені записки НТУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 33 (72) № 2. 2022. С.221-232.
25. Барон Л.И. Кусковатость и методы ее измерения. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 124 с.
26. Голуб С.В. Багаторівневе моделювання в технологіях моніторингу оточуючого середовища. Монографія. Черкаси: Вид. від. ЧНУ імені Богдана Хмельницького, 2007. 220 с. ISBN 978-966-353-062-8.
27. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. К. : Наук. думка, 1982. 296 с.
28. L. Deng and D. Yu. Deep Learning: Methods and Applications / Foundations and Trends in Signal Processing, 2013.vol. 7, nos. 3-4, pp. 197-387.
29. Вища математика. Навчальний посібник для студентів технічних напрямків підготовки / Укладач: В. В. Бакун. — К. : НТУУ «КПІ», 2013. — С. 109—110. — 270 с.
30. Weiner N. The Extrapolation Interpolation and Smoothing of Stationary Time-Series. I. Willey, N.Y., 1949. — 290 p.
31. Колмогоров А. Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей // Изв. АН СССР. Сер. математика, 1941.т. 5(1), С. 3-14.
32. Ivakhnenko A.G., Ivakhnenko G.A. and J.A. Muller Self-Organization of Neuronets with Active Neurons / Pattern Recognition and Image Analysis, 1994, vol.4, no.4, pp.177-188.