

ЩІПАНОВ ІГОР

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

<https://orcid.org/0000-0001-7404-7264>e-mail: igorshipanov2904@gmail.com

СОЛОВЕЙ АНДРІЙ

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

<https://orcid.org/0000-0002-4593-702X>e-mail: andre37gv8@gmail.com

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ЗОВНІШНЬОЇ ОБОЛОНКИ ЗАРЯДУ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО НАПРАВЛЕНОГО РОЗКОЛУ ГІРСЬКИХ ПОРІД

Актуальною задачею в гірничій та будівельній промисловості є як можливо більш ефективно та безпечно проведення вибухових робіт. В статті акцентується увага на важливості оптимізації параметрів оболонки для досягнення кращого контролю над процесом розколу. В роботі описуються параметри дроблення та тріцинування, що виникають під час вибуху свердловинного заряду в гірському масиві, залежать від кількох ключових факторів, таких як характеристика заряду ВР, щільність заряджання та швидкість детонації ВР, а також межі міцності гірських порід на стиснення і зсув.

Ключові слова: направлений розкол; зовнішня оболонка; вибух, вибухові речовини; зона вибухового розпушення; інтенсивне дроблення; гірський масив; тріцинуватість; вибухові роботи; радіус зони тріцинування.

SCHIPANOV IGOR, SOLOVEI ANDRII

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University

ANALYSIS OF PARAMETERS OF THE EXTERNAL CHARGE CASING FOR EFFICIENT DIRECTIONAL ROCK SPLITTING

The article emphasizes the selection of parameters for the external casing of an extended spacing explosive material to ensure effective and safe execution of explosive operations in the mining and extraction industry. The study examines and analyzes how the effectiveness of directional rock fracturing depends on various factors, including the type of explosive material, the shape and size of the explosive charge, parameters of the external casing of the explosive, as well as the geological characteristics of the rock formations. The choice of material for the external casing is discussed as it directly impacts its strength and resistance to loads. To achieve efficient energy transmission during the explosion and reduce the risk of casing rupture, it is suggested to calculate the optimal thickness. Using the heat conduction equation, the minimum thickness that prevents overheating of the casing can be determined. Ensuring the casing's hermeticity is crucial for the stability of the explosive material and to prevent unintended detonation. The hermeticity level can be determined using the formula presented in the study. For precise rock fracturing, the use of a remote initiating mechanism is proposed, which triggers at a specified moment. To enhance uniform initiation of the explosive material, a structural solution of initiator placement within the explosive charge is suggested.

The presence of cracks and defects in the rock formation is highlighted as an important consideration in the development of casings for effective fracturing. It is known that when a cylindrical explosive charge is detonated within a homogeneous rock mass, three different zones are formed: the area of intense fracturing (fragmentation), the zone of crack formation (radial cracks), and the area of elastic deformation. Based on conducted research, the article presents a formula that takes into account both the main properties of the rock mass (strength characteristics and fissuring) and the parameters of blasting operations, namely the charge radius and explosive material properties. Using the example of the iron ore quarry's geological conditions, calculations were performed for the radii of blast-induced fracturing zones when detonating borehole charges within fractured rock masses at different distances between natural cracks.

Key words: directional fission, external stain, explosion, explosives, explosive detonation zone; intensive crushing; massif; cracking; explosive works; the radius of the cracking zone.

Розкол гірських порід відіграє важливу роль у гірничій та будівельній промисловості, а також інших галузях, де земельні ресурси відіграють ключову роль. Для забезпечення ефективного та контрольованого розколу гірських порід широко застосовують вибухові речовини, проте, для досягнення високої точності та безпеки робіт, необхідно звернути особливу увагу на параметри зовнішньої оболонки. Проблема полягає у розробці та оптимізації параметрів цієї оболонки з метою забезпечення керованого та ефективного розколу гірських порід, уникаючи при цьому негативних наслідків для навколишнього середовища та безпеки робітників.

Зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями

Оптимізація процесу розколу: вивчення параметрів зовнішньої оболонки заряду є ключовим аспектом для досягнення кращої ефективності та контролю розколу гірських порід. Наукові дослідження в цьому напрямку спрямовані на визначення оптимальної товщини, матеріалу та форми оболонки для максимального використання енергії вибуху та мінімізації відбитків на гірській поверхні.

Моделювання та чисельні розрахунки: для аналізу впливу різних параметрів оболонки на процес розколу використовуються математичні моделі та чисельні методи. Розвиток нових моделей та алгоритмів дозволяє детальніше вивчити механізм дії оболонки та відповідні параметри.

Екологічна стійкість: важливим аспектом є мінімізація негативного впливу на довкілля під час використання вибухових речовин. Дослідження параметрів оболонки пов'язані з розробкою екологічно

стійких матеріалів та конструкцій, які зменшують шкідливий вплив на ґрунт, воду та повітря.

Безпека робітників: розробка оптимальної оболонки також пов'язана з підвищенням рівня безпеки робітників, які проводять вибухові роботи. Вивчення властивостей оболонки та її взаємодії з гірською породою може допомогти зменшити ризики для працівників.

Аналіз параметрів зовнішньої оболонки для ефективного направлено розколу гірських порід є актуальною проблемою, яка об'єднує науковий і практичний інтерес. Вирішення цієї проблеми має великий потенціал для покращення продуктивності гірничого виробництва та збереження природних ресурсів при одночасному забезпеченні безпеки та екологічної стійкості.

Аналіз останніх досліджень

Останні роки принесли значний прогрес у розумінні та вирішенні проблеми аналізу параметрів зовнішньої оболонки для ефективного направлено розколу гірських порід. Багато дослідників та вчених спрямували свої зусилля на вдосконалення технологій та методів, що використовуються в гірничій промисловості, зокрема, на розробку більш точних та ефективних оболонок для забезпечення контрольованого розколу.

В актуальних дослідженнях автори розглядають сучасні підходи до розробки оболонок для вибухового розколу та аналізують їхні впливи на якість розколу гірської породи. Вони вказують на важливість оптимальної геометрії оболонки, а також на використання новітніх матеріалів для забезпечення максимальної передачі енергії у гірську породу.

Також ретельно розглядається ефективність оболонок для вибухового контрольованого розколу та аналізують вплив різних параметрів оболонки на якість розколу. Розглядаються різні форми та матеріали оболонок та їх вплив на вибуховий процес та результати розколу.

Незважаючи на значний прогрес, залишаються невирішеними деякі ключові аспекти загальної проблеми аналізу параметрів зовнішньої оболонки для ефективного направлено розколу гірських порід.

Отже перелік невирішених аспектів притаманних в дослідженнях:

Вплив тріщин. Розробка оболонок для ефективного розколу має враховувати наявність тріщин та дефектів у гірській породі. Важливо вивчити, як параметри оболонки впливають на розширення тріщин та покращення якості розколу.

Реалістичне моделювання. Для більш точного аналізу необхідно реалістично моделювати різні умови гірського середовища, такі як різні типи порід, геологічні структури та глибини. Розробка більш складних та точних моделей може допомогти зрозуміти, як параметри оболонки пов'язані з реальними умовами розколу.

Ефективність вибухового процесу. Незважаючи на покращення в ефективності розколу, деякі області можуть залишатися менш ефективними через нерівномірний розподіл вибухового навантаження. Вивчення впливу параметрів оболонки на розподіл енергії може покращити цю ситуацію.

Вплив наноматеріалів. Останніми роками дослідники вивчають можливість використання наноматеріалів для створення більш міцних та ефективних оболонок. Проте питання взаємодії наноматеріалів з гірською породою та їх впливу на докільця залишаються недостатньо дослідженими.

Моделювання різних сценаріїв. Існує потреба у більш детальному моделюванні різних сценаріїв розколу з урахуванням різних параметрів оболонки. Це допоможе визначити оптимальні комбінації параметрів для різних умов гірського середовища.

Аналіз впливу на здоров'я робітників. Важливим аспектом є вивчення впливу параметрів оболонки на рівень вібрацій, шуму та пилового навантаження, які можуть вплинути на здоров'я та безпеку робітників. Додаткові дослідження можуть виявити оптимальні способи зменшення цього впливу.

Формулювання цілей статті

Означена стаття присвячується детальному аналізу параметрів зовнішньої оболонки для ефективного направлено розколу гірських порід. Вона включає у себе огляд останніх досліджень та публікацій, які становлять основу для розв'язання даної проблеми. Основні акценти робляться на важливості оптимізації параметрів оболонки для досягнення кращого контролю над процесом розколу, важливість визначити які параметри оболонки впливають на розширення тріщин, також буде проаналізовано, як різні параметри оболонки впливають на якість та ефективність розколу та на визначення невирішених аспектів, які вимагають подальших досліджень. Також може бути проведений порівняльний аналіз різних методів та підходів для вдосконалення параметрів оболонки та їх впливу на гірничі роботи, зокрема на вибуховий розкол гірських порід.

Виклад основного матеріалу

Вибухові речовини є невід'ємною частиною гірничо-видобувної промисловості, забезпечуючи ефективний спосіб розколу гірських порід. Направлений розкол відіграє важливу роль у досягненні точного та контрольованого руйнування порід з метою підвищення безпеки та ефективності видобутку. Однак від успішності цього процесу в значній мірі залежать параметри зовнішньої оболонки подовженого зазору вибухових речовин. Використання формул та математичних моделей допомагає раціонально підійти до проектування такої оболонки.

Зовнішня оболонка заряду вибухової речовини повинна відповідати ряду вимог, зокрема: забезпечувати рівномірний розподіл вибухової речовини по зазору; запобігати передчасному вибуху

вибухової речовини; забезпечувати направлене поширення ударної хвилі; мінімізувати пошкодження навколишніх гірських порід.

Параметри зовнішньої оболонки зазвичай визначаються на основі результатів численних випробувань. До основних параметрів зовнішньої оболонки належать: матеріал оболонки; товщина оболонки; герметичність оболонки; форма оболонки; тип з'єднання оболонки з зарядом вибухової речовини.

Ефективність направлено розколу гірських порід залежить від багатьох факторів, зокрема від типу вибухової речовини, форми і розмірів заряду вибухової речовини, параметрів зовнішньої оболонки, а також від гірничо-геологічних характеристик гірських порід.

За допомогою правильного вибору параметрів зовнішньої оболонки можна значно підвищити ефективність направлено розколу гірських порід.

Вибір матеріалу для зовнішньої оболонки має прямий вплив на її міцність та стійкість до навантажень. Міцність зовнішньої оболонки може бути оцінена за допомогою формули пружного розтягу:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (1)$$

де σ – напруженість;

F – прикладена сила;

A – площа перерізу оболонки. Залежно від властивостей матеріалу оболонки (модуль пружності E

σ_{max} та межа міцності σ_{max}), можна обрати оптимальний матеріал, що забезпечує необхідну міцність.

Для досягнення ефективної передачі енергії вибуху та зменшення ризику розриву оболонки, можна використовувати розрахунок оптимальної товщини. За допомогою рівняння теплопровідності можна знайти мінімальну товщину, яка запобігає перегріву оболонки:

$$h = \sqrt{\frac{4kt}{\pi\rho c}}, \quad (2)$$

де k – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, t – час вибуху;

ρ – щільність матеріалу оболонки;

c – його теплоємність.

Герметичність оболонки важлива для забезпечення стабільності вибухової речовини та попередження її не жаданого спрацювання. Величина герметичності може бути визначена за допомогою формули:

$$K_r = \frac{V_{витік}}{V_{зар} \Delta P}, \quad (3)$$

де $V_{витік}$ – об'єм витікання газу;

$V_{зар}$ – загальний об'єм вибухової камери;

ΔP – різниця тиску.

Для досягнення точного розколу гірських порід, можна використовувати віддалений ініціюючий механізм, який спрацьовує в заданий момент часу. Швидкість поширення звуку c може бути використана для розрахунку відстані до вибухового заряду:

$$d = \sqrt{\frac{Lc}{2}} \quad (4)$$

де d – відстань до вибухового заряду;

L – час запуску;

c – швидкість звуку.

Форма оболонки повинна відповідати формі зазору. Найпоширенішими формами оболонок є циліндричні, конічні та сферичні.

Тип з'єднання оболонки з зарядом вибухової речовини повинен забезпечувати надійне зчеплення між ними і запобігати передчасному вибуху вибухової речовини. Найпоширенішими типами з'єднання оболонки з зарядом вибухової речовини є зварювання, паяння та клеювання.

Для підвищення рівномірного ініціювання вибухової речовини в роботі [3] пропонується використовувати конструктивне рішення де вирішується питання ефективного розташування ініціюючої системи в вибуховій речовині:

Пропонується використовувати 3 або більше ініціаторів в ініціюючій системі які зміщені один відносно одного на кут α , який розраховується по формулі:

$$\alpha = 360^\circ : N, \quad (5)$$

де N – кількість ініціаторів.

Крім того відстань між ініціаторами вздовж осі розраховується по формулі

$$H = \frac{L}{N}, \quad (6)$$

де L — довжина заряду вибухової речовини.

Запропонована конструкція забезпечує за рахунок взаємодії детонаційних хвиль нерівномірне

просторове динамічне навантаження середовища, що руйнується та підвищує ефективність його вибухового руйнування.

Важливий момент в розробці оболонок для ефективного розколу має враховуватись наявність тріщин та дефектів в гірській породі. В роботі [4] автор акцентує увагу на важливість визначити які параметри оболонок впливають на розширення тріщин та покращення якості проведення робіт та інших показників, для більш точного аналізу потрібно максимально точно моделювати проходження процесів в різних умовах гірського середовища.

Під час здійснення вибуху циліндричного заряду вибухової речовини (ВР) на однорідний гірський масив утворюються три різних зони: область інтенсивного розколювання (змелення); зона формування тріщин (радіальні тріщини); область еластичних деформацій. Звичайно, межі між цими зонами не є чіткими, але вони поступово переходять одна в одну, і радіус зони формування тріщин визначає параметри загальної області розколювання. Механізми створення цих зон та їх характеристики визначаються як характеристиками ВР та конструкцією зарядної порожнини, так і властивостями гірського масиву, який стає об'єктом руйнування. Визначення розмірів областей інтенсивного розколювання та радіальних тріщин є важливою задачею під час проведення вибухових робіт на гірничих підприємствах, оскільки це впливає на ефективність руйнування гірського масиву.

Водночас відомо, що більшість гірських масивів, які підлягають промислому руйнуванню, мають тріщини, і при впливі вибухового навантаження більша частина породи розламується вздовж існуючих тріщин в масиві. Лише певний фрагмент масиву, що межує з зарядом, піддається розколюванню на дрібніші частинки, ніж це відбувається з натуральними об'єднаннями. Розмір зони поширення вибухової дії та обсяг інтенсивного розколювання визначаються, так само як і в разі розколювання однорідного середовища, характеристиками застосованої ВР і міцністю та тріщинисті гірських порід. Тому питання відносно руйнування тріщинуватого масиву завжди отримує значний розгляд, а визначення розмірів вищезгаданих руйнівних зон в різних гірничо-геологічних і гірничотехнічних умовах стає предметом науково-технічної проблеми, вирішення якої надає можливість ефективно контролювати вплив вибуху на гірський масив.

Встановлено, що в тріщинуватих масивах гранично можливий радіус зони розпушення збільшується обернено пропорційно коефіцієнту структурного ослаблення, який функціонально визначається зі співвідношення гранично можливого радіуса зони тріщиноутворення у монолітному масиві до середньої відстані між тріщинами.

З урахуванням проведених досліджень в роботі [4] формула набуває такого вигляду:

$$R_p = 1,4 R_{II} \sqrt{\frac{P_{BP} r_{CB} (0,97 + 0,182 \sqrt{\frac{R_{II} P_{BP} r_{CB}}{l_T^2 \tau}})}{R_n \tau}}, \quad (7)$$

де R_{II} – радіус зони інтенсивного дроблення гірського масиву, яка утворюється під час підривання в ньому заряду ВР;

P_{BP} – середній тиск продуктів детонації ВР у зарядній камері;

r_{CB} – радіус циліндричного заряду (свердловини або шпуру);

τ – межа міцності руйнування гірської породи на зсув, Па;

l_T – середня відстань між тріщинами.

Аналіз формули свідчить, що вона враховує як основні властивості гірського масиву (міцнісні характеристики та тріщинуватість), так і параметри буропідривних робіт, а саме радіус заряду та властивості вибухової речовини.

Аналіз даних показує, що за таких гірничо-геологічних умов, радіус зони вибухового розпушення зменшується зі збільшенням відстані між тріщинами. Для надзвичайно тріщинуватого (I категорія тріщинуватості) гірського масиву з відстанню між природними тріщинами до 0,1 м чисельне середнє значення радіуса зони вибухового розпушення становить 6,24 м. Для сильно тріщинуватих скельних масивів (II категорія тріщинуватості) з максимальною відстанню між тріщинами 0,5 м значення радіуса зони вибухового розпушення значно зменшується і становить 3,77 м. Для III категорії тріщинуватості гірських порід (середньотріщинуватий масив) з відстанню між тріщинами до 1 м вказаний параметр зменшується до значення 3,33 м, тобто в порівнянні з попередньою категорією зменшення становить 0,5 м, або близько 15 %. Для малотріщинуватих масивів (IV категорія) радіус зони вибухового розпушення становить 3,18 м для граничної відстані між тріщинами 1,5 м і для практично монолітних скельних порід V категорії тріщинуватості, де відстань між тріщинами становить більше 1,5 м, розміри зони розпушення майже не зменшуються (при зміні відстані між тріщинами з 1,5 до 2,0 м радіус зменшується з 3,18 до 3,09 м). В цілому ж на досліджуваному інтервалі зміни відстані між тріщинами з 0,1 до 2,0 м радіус зони розпушення зменшується з 6,24 до 3,09 м, тобто у 2,01 рази. Найбільша інтенсивність зменшення радіуса припадає на II категорію тріщинуватості гірського масиву, де його значення зменшується у 1,65 рази при збільшенні відстані між тріщинами до 0,5 м.

Висновки

Висновки дослідження вказують на те, що параметри дроблення та тріщиноутворення, які виникають під час вибуху свердловинного заряду в гірському масиві, залежать від кількох ключових факторів: діаметра заряду ВР, щільності заряджання та швидкості детонації ВР, а також меж міцності гірських порід на стиснення і зсув.

Особливу увагу слід звернути на зв'язок між радіусом зони вибухового розпушення та структурним ослабленням гірського масиву. За отриманими результатами, радіус зони вибухового розпушення в тріщинуватих масивах демонструє збільшення в порівнянні з радіусом зони тріщиноутворення у монолітних масивах. Це збільшення є оберненою пропорцією до коефіцієнта структурного ослаблення, який в свою чергу залежить від середньої відстані між тріщинами.

Важливим результатом дослідження є розроблена формула для визначення радіуса зони вибухового розпушення в тріщинуватих масивах. Ця формула пов'язує основні параметри гірського масиву та характеристики заряду вибухової речовини.

На прикладі гірничо-геологічних умов залізородного кар'єру були проведені розрахунки радіусів зон вибухового розпушення при підриванні свердловинних зарядів у тріщинуватому гірському масиві за різних відстаней між природними тріщинами. Виявлено, що зміна відстані між тріщинами від 0,1 до 2,0 м призводить до зменшення радіуса зони розпушення з 6,24 до 3,09 м, тобто на 2,01 рази. Зокрема, найбільше зниження цього параметра відбувається у масиві II категорії тріщинуватості, і воно складає 65% при збільшенні відстані між тріщинами від 0,1 до 0,5 м.

Використання конструкційних рішень для розташування ініціаторів в заряді вибухової речовини, раціональний вибір основних параметрів зовнішньої оболонки і застосування формул та математичних моделей у проектуванні зовнішньої оболонки дозволяє досягти оптимальних параметрів для забезпечення безпеки, ефективності та точності направлено розколу гірських порід. Врахування цих параметрів під час проектування вибухових пристроїв сприяє підвищенню продуктивності та зниженню впливу на навколишнє середовище.

Отримані дані дозволяють вибрати більше правильний вектор наукових досліджень у постановці питань поставлених в роботі. Зокрема, перспективними є дослідження з визначення параметрів зони вибухового розпушення під час застосування різних типів ВР у різноманітних гірничо-геологічних умовах та подальшої роботи над більш ефективною оптимізацією проведення робіт.

Література

1. Воробійов В. В. Вплив конструкції заряду на характер розвитку початкової стадії руйнування твердих середовищ / В. В. Воробійов, М. В. Помазан // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2014. – № 1. – С. 124–129.
2. Коробійчук В. В. Руйнування гірських порід і промислова сейсміка / В. В. Коробійчук, В. Г. Кравець, В. В. Бойко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 400 с.
3. Патент на корисну модель № 3485/ЗУ/23 (2023.04). Свердловинний заряд вибухової речовини / Воробійов В. В., Воробійова Л. Д., Шчіпанов І. А. – u 2023 01418, 2014, 5 с.
4. Фролов О. О. Визначення радіуса зони вибухового розпушення тріщинуватого скельного гірського масиву при підриванні свердловинного заряду / О. О. Фролов, М. І. Бельтек // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2020. – № 2. – С. 43–47.
5. Симанович Г. А. Руйнування гірських порід вибухом / Г. А. Симанович, О. Є. Хоменко, М. М. Кононеко. – Дніпропетровськ : ДНГУ, 2014. – 206 с.
6. Бойко В. В. Спеціальні вибухові технології в геоінженерії / В. В. Бойко, А. Л. Ган, О. В. Ган. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 315 с.
7. Фролов О. О. Встановлення закономірностей руйнування природно порушених скельних масивів вибухом / О. О. Фролов, М. І. Бельтек // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2019. – № 1 (83). – С. 283–288.
8. Фролов О. О. Лабораторні дослідження впливу хвиль напружень під час вибуху на параметри руйнування моделі / О. О. Фролов, В. В. Котенко // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2014. – № 3 (70). – С. 124–128.
9. Фролов О. О. Керування енергетичними потоками при вибуховому руйнуванні гірських порід на кар'єрах / О. О. Фролов, А. І. Крючков, Т. В. Косенко. – Київ : «Політехніка» КПІ імені Ігоря Сікорського, 2019. – 196 с.
10. Кравець В. Г. Фізичні процеси прикладної геодинаміки вибуху / В. Г. Кравець, В. В. Коробійчук, В. В. Бойко. – Житомир : ЖДТУ, 2015. – 408 с.

References

1. Vorobiov V. V. Vplyv konstruktsii zariadu na kharakter rozvytku pochatkovoї stadiї ruїnuvannia tverdykh seredovyshch / V. V. Vorobiov, M. V. Pomazan // Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho. – 2014. – № 1. – S. 124–129.
2. Korobiiichuk V. V. Ruїnuvannia hirskykh porid i promyslova seismika / V. V. Korobiiichuk, V. H. Kravets, V. V. Boiko. – Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2020. – 400 s.
3. Patent na korisnu model № 3485/ZU/23 (2023.04). Sverdlvynnyi zariad vybukhovoї rehovyny / Vorobiov V. V., Vorobiova L. D., Shchipanov I. A. – u 2023 01418, 2014, 5 s.

4. Frolov O. O. Vyznachennia radiusa zony vybukhovoho rozpushennia trishchynuvatoho skelnoho hirskoho masyvu pry pidryvanni sverdlovyynnoho zariadu / O. O. Frolov, M. I. Beltek // *Visnyk ZhDTU. Tekhnichni nauky.* – 2020. – № 2. – S. 43–47.
5. Symanovych H. A. Ruinuvannia hirskykh porid vybukhom / H. A. Symanovych, O. Ye. Khomenko, M. M. Kononeko. – Dnipropetrovsk : DNHU, 2014. – 206 s.
6. Boiko V. V. Spetsialni vybukhovi tekhnolohii v heoinzhenerii / V. V. Boiko, A. L. Han, O. V. Han. – Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2022. – 315 s.
7. Frolov O. O. Vstanovlennia zakonirnosti ruinuvannia pryrodno porushenykh skelnykh masyviv vybukhom / O. O. Frolov, M. I. Beltek // *Visnyk ZhDTU. Tekhnichni nauky.* – 2019. – № 1 (83). – S. 283–288.
8. Frolov O. O. Laboratorni doslidzhennia vplyvu khvyl napruzhen pid chas vybukhu na parametry ruinuvannia modeli / O. O. Frolov, V. V. Kosenko // *Visnyk ZhDTU. Tekhnichni nauky.* – 2014. – № 3 (70). – S. 124–128.
9. Frolov O. O. Keruvannia enerhetychnykh potokamy pry vybukhovomu ruinuvanni hirskykh porid na karierakh / O. O. Frolov, A. I. Kriuchkov, T. V. Kosenko. – Kyiv : «Politekhnik» KPI imeni Ihoria Sikorskoho, 2019. – 196 s.
10. Kravets V. H. Fizychni protsesy prykladnoi heodynamiky vybukhu / V. H. Kravets, V. V. Korobiichuk, V. V. Boiko. – Zhytomyr : ZhDTU, 2015. – 408 s.