УДК 622.235

РОЗВИТОК КОМБІНОВАНОГО МЕТОДУ ВІДДІЛЕННЯ МОНОЛІТІВ ВІД МАСИВУ ГІРСЬКИХ ПОРІД

В. Г. Кравець, докт. техн. наук, К. К. Ткачук, докт. техн. наук, А. Л. Ган, магістр, Т. В. Гребенюк, інж., О. М. Цьохла, студ. (НТУУ "КПІ")

Наведено фізичне обгрунтування та технічне забезпечення комбінованої технології направленого руйнування монолітних гірських порід, що грунтується на використанні гідродинамічного пристрою та портативного гідропоршневого агрегату для блочного відділення каменю.

Ключові слова: навантаження, спільна дія, гідропоршневий агрегат, гідродинамічна установка, руйнування, свердловина.

Приведено физическое обоснование и техническое обеспечение комбинированной технологии направленного разрушения монолитных горных пород, основанной на применении гидродинамического устройства и портативного гидропоршневого агрегата для блочного отделения камня.

Ключевые слова: нагрузка, совместное действие, гидропоршневой агрегат, гидродинамическая установка, разрушение, скважина.

Physical substantiation and technical means for the combined technology of the directed destruction of the monolithic rocks based on application of the hydrodynamic device and the portable hydropiston unit for block separation of stone is resulted.

Key words: load, joint action, hydropiston aggregate, hydrodynamic plant, destruction, hole.

Вступ. Гірські породи, що перебувають у напруженому стані, близькому до межі міцності, при прикладенні незначного динамічного навантаження інтенсивно руйнуються. Експериментальне дослідження принципу суперпозиції полів напружень при статичних і динамічних навантажених дає підстави вважати, що цей принцип з певними допущеннями може бути використаний для прогнозу напруженого стану середовищ і при комбінованому, статико-динамічному впливі. Проте це положення має бути перевірене експериментально. Методична особливість досліджень полягає в тому, що в моделі вибурювались два шпури, призначених для прикладання статичних та динамічних навантажень на модель [1–4].

Метою подальших експериментальних досліджень було встановлення ефективності застосування гідродинамічного пристрою та портативного гідропоршневого агрегату при статичних та динамічних навантаженнях.

Спочатку модель навантажувалася статичним способом в одному з шпурів із записом сигналів датчиків на осцилограмі. Після досягнення номінального статичного тиску P_1 до стабілізації напруженого стану моделі в

другому шпурі генерувалося динамічне навантаження P_2. Викликане ним поле напружень реєструвалося датчиками. З метою зменшення ймовірності непрогнозованого руйнування моделі в експериментах, як правило, приймалося, що $P_1 \geq P_2$. За записами на осцилограмі визначали результуюче напруження і частковий внесок у нього кожного з навантажень. Усього було проведено 20 експериментів. На рис. 1, 2 наведені результати обробки осцилограм цих експериментів, у яких P_1 варіювалось в середньому по групі від 38,9 до 40,6 МПа і від 19,8 до 20,6 МПа, а P_2 – від 9,2 до 31,1 МПа.

Із цих даних легко помітити, що принцип суперпозиції витримується і при комбінованих навантаженнях, причому для опису закономірностей розподілу напружень по найкоротшій відстані між порожнинами можуть бути використані розрахункові залежності, встановлені для статичних і динамічних режимів навантаження.

Викладення основного матеріалу. Найважливішим елементом будь-якого з розглянутих методів впливу на породний масив з метою утворення направленого розколу при відділенні блочного каменю є визначення граничної відстані між шпурами, яка забезпечує змикання тріщин розриву від сусідніх джерел тиску. Експериментальний пошук такої відстані вимагає проведення великої кількості трудомістких дослідів.

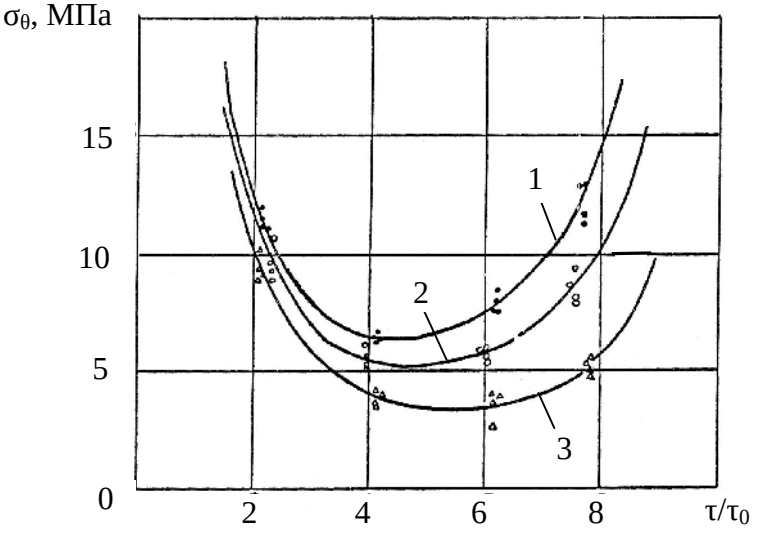

Рис. 1. Напружений стан моделі при статико-динамічному навантаженні: крива *1* – P_1 = 40,6 МПа, P_2 = 29,8 МПа; крива *2* – P_1 = 39,8 МПа, P_2 = 20,2 МПа; крива *3* – P_1 = 38,9 МПа і P_2 = 9,6 МПа

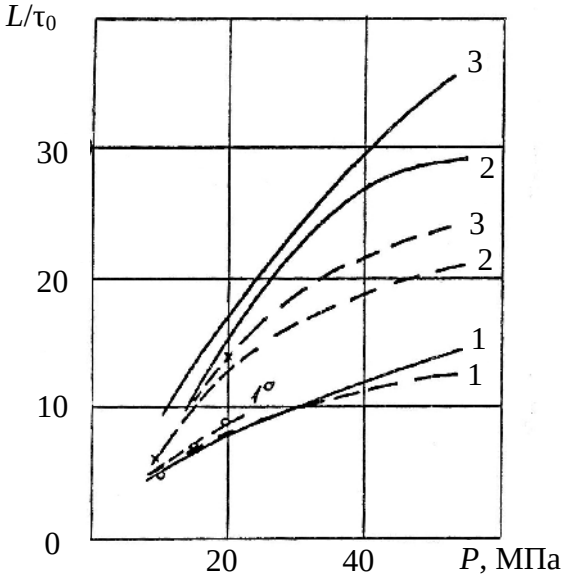

Рис. 2. Залежність граничної відстані L між порожнинами навантаження від амплітуди τ_0 однакових внутрішніх тисків P (для моделі нескінченних розмірів)

Тому для попередньої оцінки цієї відстані був проведений чисельний експеримент із використанням теоретичних рішень такого завдання. Результати чисельного експерименту у вигляді залежностей $\alpha(P)$ для різних режимів навантаження при однакових амплітудах внутрішнього тиску показані на рис. 2 (штрихові лінії), де крива *1* побудована для умов статичного навантаження, крива *2* – для умов динамічного навантаження і крива *3* – для умов комбінованої взаємодії порожнин навантаження в моделі безмежних розмірів. Для порівняння наведена залежність $\alpha(P)$ (крива *1*) для умов взаємодії статичних навантажень у моделі реальних розмірів. Аналіз цих кривих дозволяє зробити кілька висновків. По-перше, зі збільшенням внутрішнього тиску гранична відстань між сусідніми порожнинами навантаження швидко росте, однак ця залежність носить загасаючий характер, що найбільш яскраво проявляється при динамічних взаємодіях (крива *2*). По-друге, менша відстань між порожнинами потрібна при статичних режимах навантаження. Це говорить про те, що використання тільки статичних навантажень у практиці відколювання блокового каменю є неекономічним. При динамічних взаємодіях відстань між сусідніми шпурами може бути збільшена в 1,5...1,6 рази, однак відзначена вище можливість утворення додаткових тріщин викликає небезпеку пошкодження блоків і вимагає зменшення відстані між шпурами з метою створення умов гарантованого розколу середовища по лінії міжпорожнинної взаємодії. Найбільша відстань між сусідніми порожнинами (шпурами, свердловинами) досягається при комбінованій статико-динамічній взаємодії порожнин навантаження, що дозволяє майже вдвічі збільшити відстань між джерелами навантаження порівняно зі статичним впливом [4].

Для обчислення рівня і характеру взаємодії різних типів пар навантажень використано такі залежності:

для взаємодії рівновеликих статичних навантажень:

$$\alpha = 2\sqrt[3]{\frac{4\pi P r_0^4}{\gamma E}}; \tag{1}$$

при взаємодії нерівновеликих статичних навантажень:

$$\alpha = r_1 + r_2; \tag{2}$$

$$r_1 = \sqrt[3]{\frac{4\pi P_1 r_0^4}{\gamma E}}; \quad r_2 = r_1\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{2/3}; \tag{3}$$

при взаємодії рівновеликих динамічних навантажень:

$$\alpha = 2\left(\frac{4\pi P B^2 r_0^{2\alpha}}{\gamma E k}\right)^{\frac{1}{2\alpha-1}}; \tag{4}$$

при взаємодії нерівновеликих динамічних навантажень:

$$\alpha = \left(\frac{4\pi P B_1^2 r_0^{2\alpha_1}}{\gamma E k_1}\right)^{\frac{1}{2\alpha_1-1}} + \left(\frac{4\pi P B_2^2 r_0^{2\alpha_2}}{\gamma E k_2}\right)^{\frac{1}{2\alpha_2-1}}; \tag{5}$$

при статико-динамічній взаємодії розрахунок проводиться по формулі (2), де величини r_1 і r_2 знаходять зі співвідношень

$$\frac{P_1 r_0^2}{r_1^2} + \frac{P_2 r_0^{\alpha_2}}{k_2^{\alpha_2}\eta_1^{\alpha_2}} = \sqrt{\frac{\gamma E}{\pi r_1}}\ ;\ r_2 = k_2 r_1. \qquad (6)$$

У цих формулах індекси 1 і 2 вказують відношення до першого або другого джерела навантаження; k_1 і k_2 – коефіцієнти, що дорівнюють E_q/E_c при швидкостях навантаження, створюваних тиском у першій і другій порожнинах (при $\sigma_Q \to 0$, $k \to 1$).

Результати розрахунків за формулами (1)–(5) наведені на рис. 2 (суцільні лінії) і 3. Звертає на себе увагу якісна ідентичність суцільних і штрихових кривих на рис. 2, що свідчить про об'єктивність прийнятої моделі руйнування твердих тіл. Однак у кількісному відношенні граничні відстані, визначені цими методами, відрізняються одна від одної, причому ця різниця істотна лише при динамічних і комбінованих навантаженнях і зростає зі збільшенням амплітуди навантаження. Так, якщо при $P \le 20$ МПа вона практично непомітна, то при $P \ge 40$ МПа ця різниця збільшується до 35...42 %. Це, вочевидь, пов'язане з тим, що математична модель руйнування не враховує зміни опору середовища розриву в міру розвитку тріщини. Порівняємо теоретичні результати з даними безпосередніх спостережень. На рис. 2 дослідні дані про величину α/r_0 нанесені точками (світлі точки – для статичного навантаження, хрестики – для динамічного). Легко помітити, що для статичних навантажень у задовільній згоді з експериментом перебувають результати розрахунків як за формулами (1)–(5), так і по математичній моделі. При малих ($P \approx 10\ldots15$ МПа) динамічних навантаженнях збіг розрахункових величин α з її експериментальними значеннями також відзначається для обох розрахункових методів, і лише при $P \ge 20$ МПа експериментальні результати в динаміці помітно відрізняються від розрахункових, займаючи проміжне положення між теоретичними кривими.

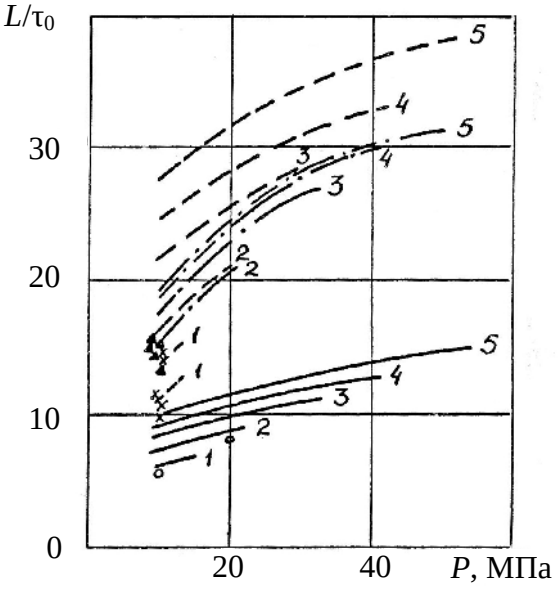

Рис. 3. Гранична відстань між шпурами нерівномірного навантаження при взаємодії статичних (суцільні лінії), динамічних (штрих-пунктирні лінії) і комбінованих статико-динамічних (штрихові лінії) навантажень: криві *1* – при P_1 = 20 Мпа; криві *2* – при P_1 = 30 МПа; криві *3* – при P = 40 МПа; криві *4* – при P_1 = 50 Мпа; криві *5* – при P_1 = 60 МПа

З рис. 3 випливає, що гранична відстань між джерелами збурень, як і при рівновеликих навантаженнях, зростає з ростом інтенсивності збурень, причому при динамічних процесах вона більша, ніж при статичних, а максимальних значень досягає при комбінованому статико-динамічному навантаженні.

Завершуючи опис модельних експериментів, треба підкреслити, що, як і передбачалося завданнями дослідження, метою є перевірка загальних фізичних принципів і встановлення якісних закономірностей формування напружено-деформованого стану твердого середовища при дії поодиноких і групових (взаємодіючих) джерел навантаження, руйнування середовища тріщинами розриву, а також доказ застосовності математичної моделі руйнування твердих середовищ при взаємодії декількох джерел навантаження, розташованих по лінії передбачуваного розколу, і розрахункових залежностей, отриманих при обробці експериментальних даних.

Що стосується практичного застосування розглянутого комбінованого методу відділення монолітів, то пропонується поєднання описаних нижче методів контрольованого навантаження – спочатку статичного навантаження і на його тлі – прикладання динамічного імпульсу.

Для забезпечення комбінованого навантаження з метою відділення монолітів розроблено портативний гідропоршневий агрегат для прикладання статичного зусилля та гідродинамічний пристрій для генерації динамічного імпульсу в безпечному режимі.

Метою цієї розробки було підвищення надійності устаткування, зниження трудомісткості його обслуговування і забезпечення направленого руйнування гірських порід. Гідропоршневий агрегат (рис. 4) включає корпус, в якому розташований один поршень з клином і один зі сферичною головкою. Агрегат установлюється в шпурі, виконаному в гірській породі. При цьому вісь поршнів із клином розташовується в необхідній площині руйнування. Потім робітник починає натискати ногою на педаль *15*, що через важіль *8* і вісь *7* переміщує плунжер *2* вниз. При цьому робоча рідина з порожнини *19*, через отвір *16* надходить у порожнину плунжера *18*. Як тільки плунжер *2* перекриє отвір *18*, починається стиск робочої рідини в порожнині плунжера *18*, і вона через зворотний клапан *21* і отвір *17* надходить у внутрішню кільцеву канавку *20*. З канавки *20* робоча рідина через канали *37*, *38* і *39* надходить під торець поршня (поршнів), що починає висуватися з корпуса агрегату *27* і при цьому своїм клином діє на стінку шпуру, що приводить до утворення на вільній поверхні шпуру тріщини, яка збігається з необхідною площиною руйнування породи.

Після утворення тріщини в породі робітник повертає рухомий упор *33* проти годинникової стрілки навколо осі і натискає педаль *15*. При цьому плунжер *2* переміщається вниз своїм упором *3* і відкриває зворотний клапан *21*.

Оскільки гідравлічна система агрегату після цього розвантажується від високого тиску, то робітник може вільно повернути на 90° корпус гідронасоса *1* відносно корпуса агрегату *27*.

При подальшому нагнітанні тиску починає висуватися поршень і своєю сферичною головкою розвивати вже отриману тріщину на поверхні шпуру, що в остаточному підсумку приведе до руйнування гірської породи.

Ефективність застосування пристрою обумовлена підвищеною надійністю устаткування завдяки відсутності шлангів високого тиску, а також зниженням трудомісткості обслуговування устаткування завдяки відсутності пересувної насосної станції з приводом, а також виключенню операцій, пов’язаних з підключенням шлангів високого тиску.

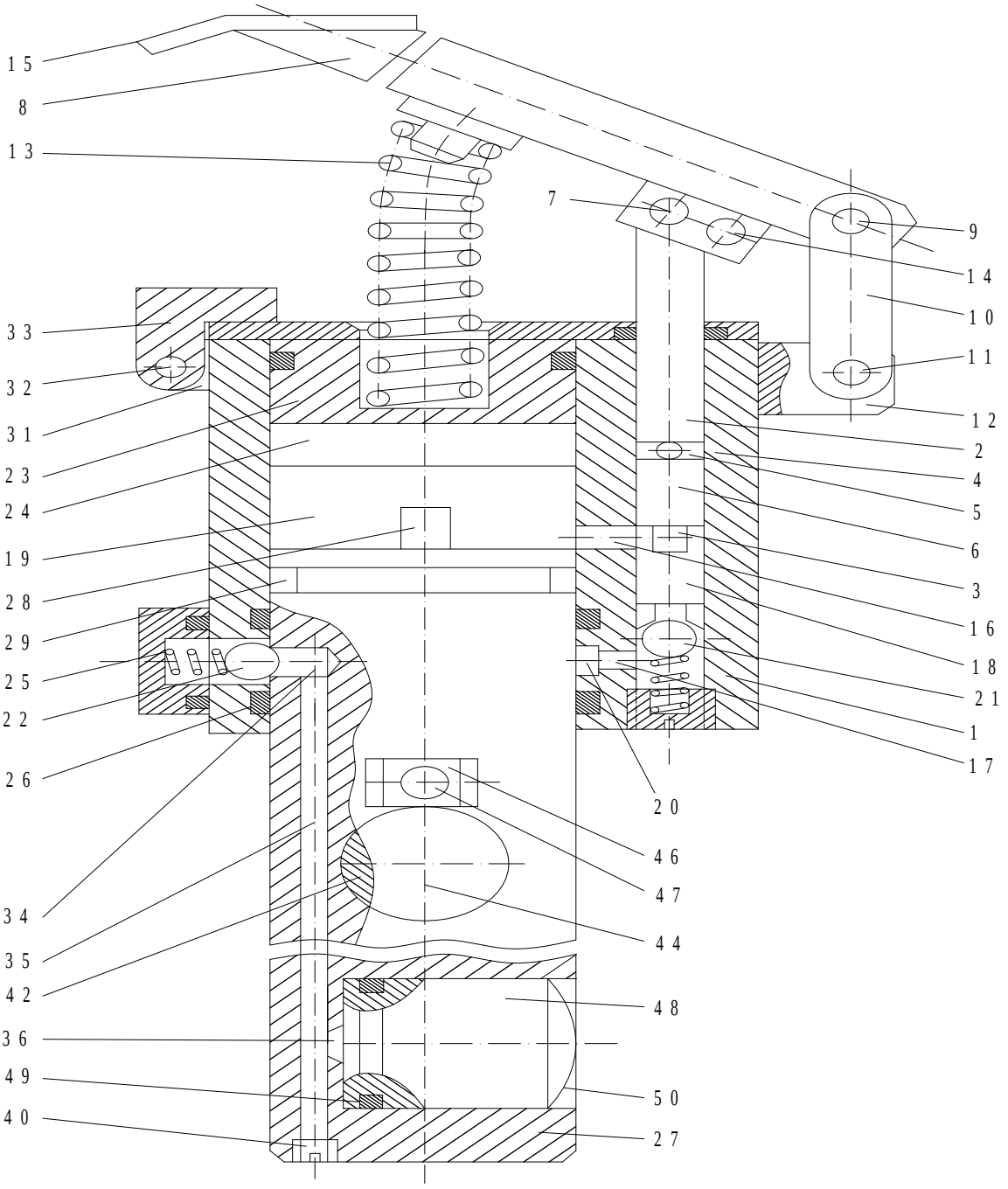

Рис. 4. Загальний вигляд гідропоршневого агрегату

Гідродинамічна установка для блочного відділення каменю та принцип її дії показані відповідно на рис. 5 і 6. Для реалізації запропонованого способу відділення блоків проводиться буріння на глибину відбійки по лінії відколу вибухових та проміжних шпурів, що заливаються водою. Вибуховий заряд розміщується в закритій камері, залитій водою, яка з'єднується зі свердловиною через насадку.

Гідродинамічний пристрій може також застосовуватися у комбінації з гідропоршневим агрегатом, коли у ряді шпурів через шпур створюється статичне навантаження масиву за допомогою гідропоршневого агрегату, а в проміжних шпурах створюється динамічне навантаження гідродинамічним пристроєм, що приводить до руйнування по лінії відколу попередньо напруженого масиву.

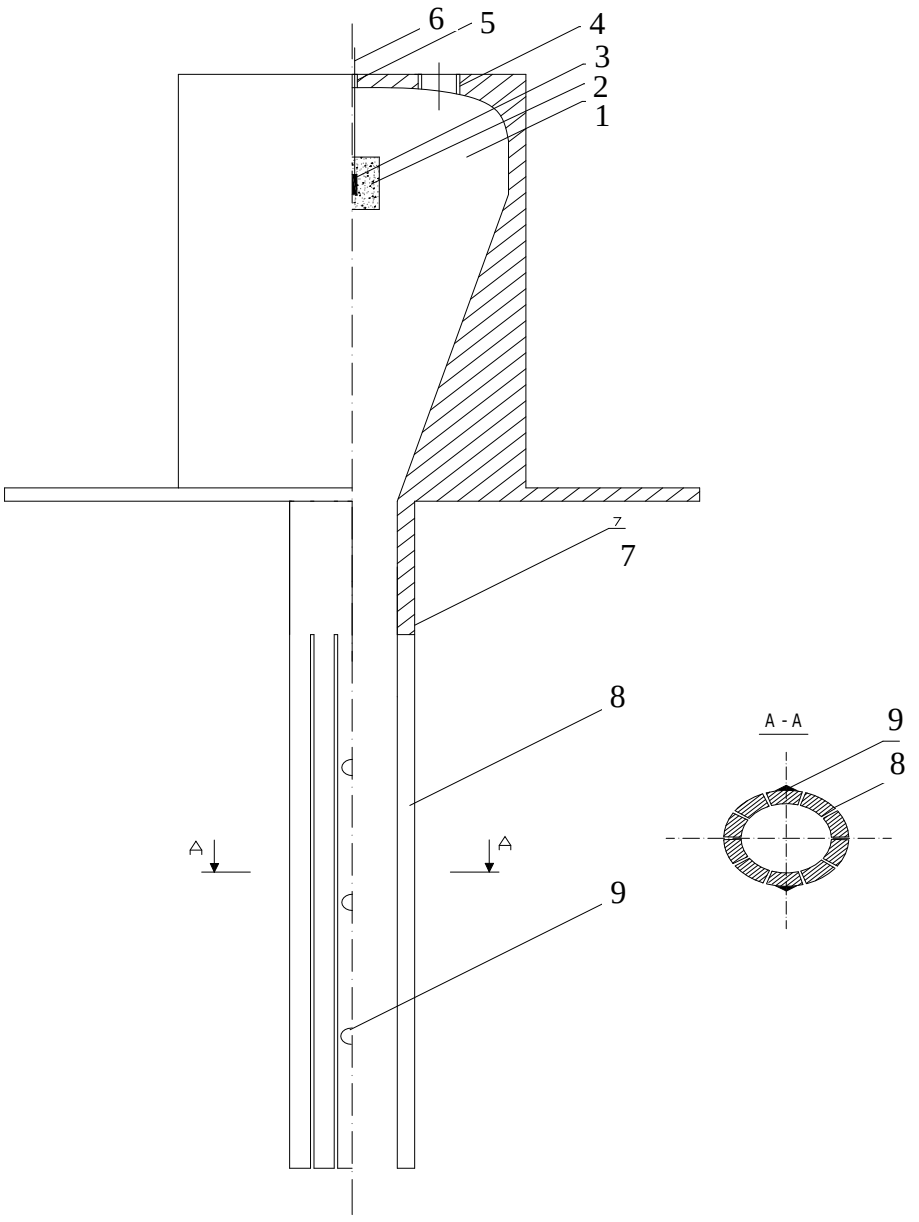

Рис. 5. Конструктивна схема гідродинамічного пристрою

Гідродинамічний пристрій (рис. 5) складається з вибухової камери, що заповнюється водою, у якій розміщується заряд вибухової речовини *2* з ініціюючим пристроєм *3*, який приводиться в дію через провідники *6*, пропущені крізь отвір *5* у верхній частині камери. У верхній частині камери виконаний також отвір *5* з нарізкою, через який пристрій наповнюється водою. Після наповнення пристрою водою отвір закривається за допомогою болта. Нижня частина пристрою представлена патрубком *7* з поздовжніми прорізами, що забезпечують рух пластин *8* у напрямку дії вибухової хвилі. Твердосплавні наварки *9*, виконані на двох діаметрально протилежних пластинах *8*, виконують роль концентраторів напружень, а також утримують пристрій від руху вздовж осі його встановлення.

Принцип дії гідродинамічного пристрою зображено на рис. 6. В результаті вибуху заряду, який ініціюється електродетонатором, утворюються продукти детонації, що виходять із заряду в напрямку розвитку хімічної реакції. При цьому ударний імпульс передається в рідину, якою залитий шпур з утворенням ударної біжучої хвилі вздовж шпура. Ударна хвиля проходить із швидкістю близько 7–8 км/с і встигає після відбиття зустрітись з кінцевим тиском від детонаційних газів, завдяки чому створюється другий боковий імпульсний тиск на породу через пази.

Після зустрічі відбитої хвилі утворюється другий боковий ударний імпульс, що діє на тріщинувату структуру, утворену дією першого імпульсу.

Перевага пропонованої системи направленої відбійки над іншими пристроями полягає в тому, що до початку робіт з руйнування порід можуть бути проведені індивідуальні випробування з замірами динамічних параметрів руйнування і форм імпульсів, переданих на масив.

Отже, застосування такого методу дозволяє створити направлену лінію відколу моноліту і уникнути руйнування у зоні, наближеній до лінії відколу, з урахуванням механічних властивостей порід.

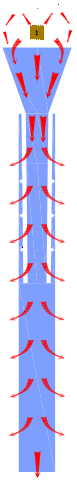

Рис. 6. Принцип дії гідродинамічного пристрою

Гідродинамічний пристрій для руйнування монолітів у більш потужному виконанні і з деякими конструктивними змінами, а саме з розбірною верхньою частиною, можливістю встановлення поздовжньої тяги з шайбами для забезпечення утримання пристрою у шпурі та з можливістю застосування заряду, еквівалентного 300 г тротилу (відповідний розрахунок наведено вище), призначена для руйнування монолітів (негабаритних шматків гірничої маси, непридатних для подальшого використання блоків). Діючи на конус, розміщений на тязі і зафіксований гайками та шайбою, ударний імпульс забезпечує утримання установки від руху вздовж шпура при наростанні тиску, а також спрямовує ударну хвилю на стінки шпура. Твердосплавні наварки, виконані на двох (можливо й більше) діаметрально протилежних пластинах патрубку, виконують роль концентраторів напружень та зумовлюють утворення зародкової тріщини, а також додатково утримують установку від руху вздовж шпуру.

Основна перевага пристрою для руйнування монолітів – скорочення витрати вибухової речовини.

Висновки

1. Статико-динамічний режим навантаження дозволяє майже вдвічі збільшити відстань між джерелами навантаження в порівнянні зі статичною *діє.*

2. Застосування гідропоршневого агрегату та гідродинамічного пристрою дозволяє створити лінію відколу моноліту і уникнути руйнування у зоні цієї лінії.

3. Пропонована система керованої відбійки має ті переваги над іншими пристроями, що до початку робіт з руйнування порід можуть бути проведені індивідуальні випробування з замірами динамічних параметрів руйнування і форм імпульсів, переданих на масив.

1. *Ткачук К. Н.* Механизм разрушения крупнокускового материала накладными зарядами из малоплотных композиций / К. Н. Ткачук, Н. В. Кривцов // Высокоэнергетическая обработка материалов. – Днепропетровск: Арт-Пресс. – С. 25–28.

2. *Кривцов Н. В.* Физические основы разрушения горных пород накладными зарядами / Н. В. Кривцов, И. А. Махоня, Е. А. Скочко, Л. А. Митюк // Разработка рудных месторождений. – Кривой Рог: КрТУ. – № 67. – 1999. – С. 32–38.

3. *Исследования и разработка* безопасных технологий ведения взрывних работ с использованием бестротиловых взрывчестых веществ/ Отчет о НИР (промежуточн.). – К., 1998. – 240 с. – ННИИОП. – Регистр. № 0199U000182.

4. *Ткачук К. К.* Разработка эффективных методов добычи гранитных блоков: дис. … докт. техн. наук: 1995 / Ткачук Константин Константинович. – Кривой Рог, 1995. – 357 с.