

ся от технологического воздействия при традиционных способах добычи угля, а скорости нагружения пласта (10-100 МПа/с) достаточны критическим скоростям. Максимальные значения динамических пригрузок и скоростей их изменения наблюдаются в точках пласта, находящихся в зоне максимума опорного давления. С увеличением длительности импульса с 0,005 до 0,15 с увеличивается величина разгрузки пласта с 0,89 до 3,2 МПа, но уменьшается скорость разгрузки с 210,83 до 21,8 МПа/с, что говорит о необходимости уточнения параметра «длительность импульса воздействия» с целью оптимизации величин разгрузок пласта и их скоростей.

Из рассмотренного вытекает, что виброимпульсное воздействие на пласт через вмещающие породы позволяет управлять напряженным состоянием пласта и, в особенности, в зоне максимума опорного давления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Софийский К.К. Нетрадиционные способы предотвращения выбросов и добычи угля / К.К. Софийский, А.П. Калфакчян, Е.А. Воробьев. – М.: Недра, 1994. – 192 с.

**УДК 622.236.4.001.1**

Д-р техн. наук В. П. Курінний,  
канд. физ.-мат. наук І. П. Гаркуша  
(ДВНЗ «Національний гірничий інститут»)

### **ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ГІРСЬКИХ ПОРОДАХ, ЩО ПРОТІКАЮТЬ ПРИ РОЗПОВСЮДЖЕННІ В НИХ УДАРНИХ ХВИЛЬ**

Выполнено теоретическое изучение различных физических процессов, протекающих в горных породах при распространении в них ударных волн.

### **THEORETICAL RESEARCH OF PHYSICAL PROCESSES IN ROCKS FLOWING AT DISTRIBUTION IN THEM OF IMPACT WAVES**

The theoretical study of different physical processes flowing in rocks at distribution in them of impact waves is executed.

Широко відомо, що велика частина корисних копалин видобувається з використанням вибухових робіт. Зростання об'ємів вживання хімічних вибухових речовин (ВР) в гірничодобувній промисловості і будівництві особливо гостро ставить проблему підвищення ефективності їх використання на руйнування гірських порід, на що в Україні витрачається біля 20% виробленої енергії. Тільки чисельність кар'єрів, що добувають будматеріали, становить 258. Щорічно руйнується і подрібнюється понад 100 млн. т руди. При цьому коефіцієнт використання енергії вибуху не перевищує 5-6%. Відбувається екологічне забруднення навколишнього середовища. При масових вибухах присутній достатньо великий відсоток негабаритних фракцій, а висока міцність шматків гірської маси призводить при повторному дробленні до великої витрати електроенергії і зносу дробарок. При дробленні граніту сортність щебеню недостатньо висока, а при

здобичі дорогоцінної мінеральної сировини спостерігається великий відсоток браку. Підвищення інтенсивності дроблення гірських порід енергією вибуху пов'язано із збільшенням питомої витрати ВР, що, як правило, веде до зростання витрат енергії вибухової речовини на отримання одиниці готової продукції. В свою чергу, підвищення енергонасиченості масиву на кар'єрах нерудних будівельних матеріалів призводить до небажаного збільшення виходу переподрібної гірської маси, знеміцненню і розльоту шматків породи і посиленню сейсмічного ефекту. Тому необхідне створення різноманітних методів і способів вибухової дії на масив, які дозволяють без збільшення енерговитрат досягати необхідного ступеня дроблення порід вибухом. На цьому ґрунтується розробка нових методів і способів вибухового дроблення для підготовки гірської маси, яка відповідає певним технологічним вимогам для різних підприємств. До методів виконання вибухових робіт при підготовці гірської маси ставляться жорсткі вимоги, задоволення яких можливе лише на основі теорії дії вибуху і наукових експериментів, які дозволяють підвищити ефективність вибухових робіт шляхом розробки інженерних методів управління енергією вибуху і підвищення його корисної роботи, в тому числі і при проведенні підземних виробок гірничодобувних підприємств.

Таким чином, цілеспрямоване керування енергією вибуху, підвищення к.к.д. вибуху, ефективності руйнування і дроблення гірських порід на основі розробки наукових основ керування руйнуванням і знеміцненням гірських порід вибухом шляхом встановлення закономірностей протікання фізичних і газодинамічних процесів в зарядній порожнині свердловинного заряду при вибусі вибухових речовин і в масиві гірських порід навколо цієї порожнини, а також розкриття механізму вибухового руйнування гірських порід залишається актуальною науково-технічною проблемою.

В результаті теоретичних досліджень розповсюдження ударних хвиль в породі отримано співвідношення, які дозволяють в першому наближенні оцінити практично всі параметри, що характеризують процес розповсюдження ударної хвилі в породі, а саме: швидкість ударної хвилі  $D$

$$D = \frac{u_n \cdot r_n}{\alpha \cdot r} = \frac{u}{\alpha} = \sqrt{\frac{p_n}{\alpha \cdot \rho_0}} \cdot \frac{r_0}{r} \cdot \left( 1 + \sqrt{\frac{2\pi \cdot p_n}{\alpha \cdot \rho_0}} \cdot \frac{t}{r_0} \right)^{\frac{1}{n+1}}, \quad (1)$$

де  $r_n, u_n$  – відповідно радіус порожнини вибуху і швидкість породи біля її стінок у момент часу  $t$ ;  $\alpha$  – коефіцієнт шпаруватості породи;  $r$  – відстань до осі свердловини;  $u$  – масова швидкість породи на відстані  $r$  від осі свердловини;  $p_n$  – початковий тиск продуктів вибуху в свердловині;  $\rho_0$  – густина породи;  $r_0$  – радіус свердловини;  $n$  – показник адиабати продуктів вибуху;  $t$  – час;

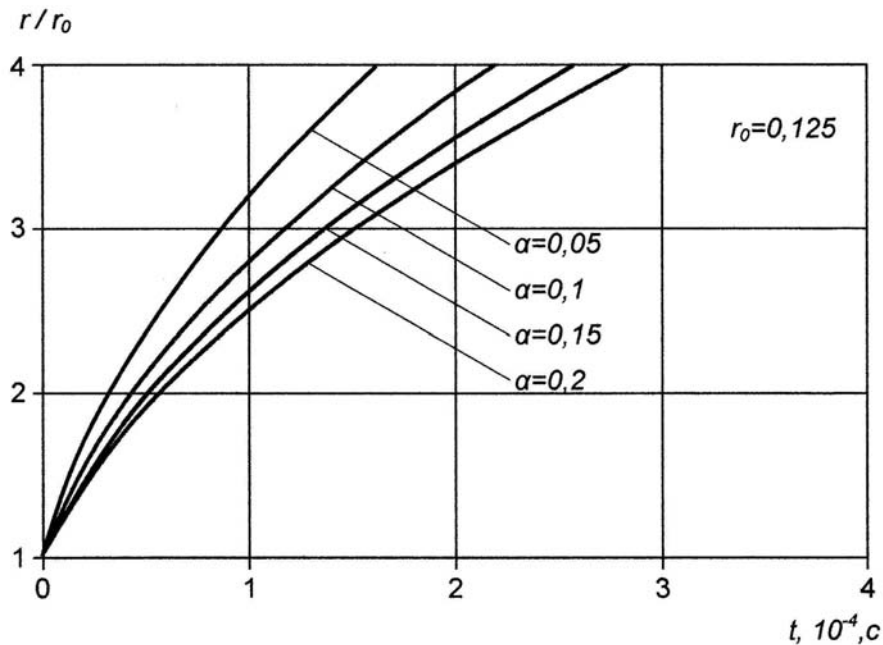
масову швидкість породи  $u$  за фронтом ударної хвилі

$$u = \sqrt{\frac{\alpha p}{\rho_0}}; \quad (2)$$

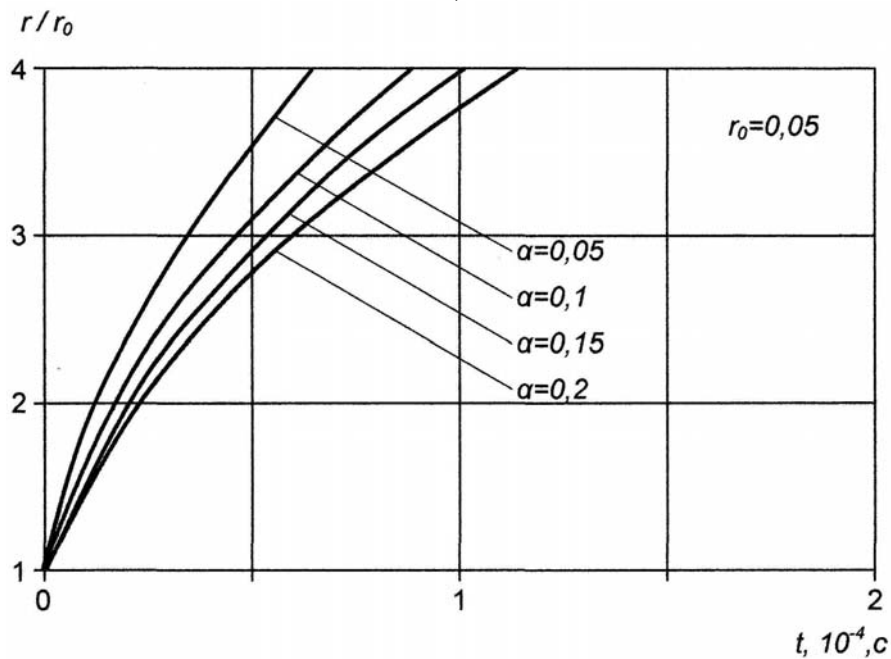
кінетичну енергію одиниці маси породи за фронтом ударної хвилі  $\epsilon$

$$\varepsilon = \frac{p\alpha}{2\rho_0} \quad (3)$$

Залежність відносного радіусу фронту ударної хвилі від часу наведено на рис. 1.



а)



б)

а)  $r_0 = 0,125$ ; б)  $r_0 = 0,05$

Рис. 1 – Залежність відносного радіусу фронту ударної хвилі від часу для свердловин радіусів  $r_0$

На підставі досліджень фізичних процесів, що протікають в гірських породах, які містять повітря в шпаровому просторі, при розповсюдженні ударних хвиль (УХ) встановлено, що в процесі генерації УХ половина роботи продуктів детонації (ПД) йде на утворення УХ, а решта – на нагрівання і роздавлювання порід. Тобто, параметри ударної хвилі не залежать від поглинаючих властивос-

тей породи.

Проведена оцінка тиску  $p_{np}$ , необхідного для збудження УХ в шпаристій породі

$$p_{np} = \rho_0 \cdot C_p^2 / \alpha, \quad (4)$$

де  $C_p$  – швидкість хвилі напружень в породі.

Визначено залежність швидкості стінок порожнини (швидкість породи біля стінки порожнини)  $u_n$  від часу

$$u_n(t) = \frac{1}{n+1} \cdot \sqrt{\frac{2\pi \cdot p_n}{\alpha \cdot \rho_0}} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{2\pi \cdot p_n}{\alpha \cdot \rho_0}} \cdot \frac{t}{r_0}\right)^{-\frac{n}{n+1}}. \quad (5)$$

Одержано залежність радіусу порожнини вибуху  $r_n$  циліндричного заряду в породі, що містить повітря в шпаровому просторі, від часу

$$r_n = r_0 \left(\frac{u_n(n+1)}{r_0} t + 1\right)^{\frac{1}{n+1}} = r_0 \left(\sqrt{\frac{p_n \alpha}{\rho_0}} \cdot \frac{t}{r_0} + 1\right)^{\frac{1}{n+1}}. \quad (6)$$

Встановлено, що при розповсюдженні УХ в породі хвиля зазнає протитиск, який приблизно дорівнює динамічній межі міцності породи при нерівнокомпонентному тривісному стисненні.

Розглянуто процес формування УХ в породі, ударну адіабату якої задано у формі Тета. Цей процес розглядається як послідовність елементарних хвиль напружень, таких, що кожна наступна хвиля рухається із швидкістю, більшою, ніж попередня.

Умовою формування УХ було утворення ступеневого профілю хвилі. В результаті одержана формула, яка дозволяє визначити тиск  $p_s$ , необхідний для збудження ударної хвилі

$$p_s = kt_s = kn\Delta t / \left(1 - \left(1 + \frac{k(n-1)\Delta t}{A}\right)^{-\frac{m+1}{2m}}\right), \quad (7)$$

де  $k$  – швидкість зростання тиску на породу;  $t_s$  – час формування УХ;  $n$  – номер елементарної хвилі напружень;  $\Delta t$  – проміжок часу між збудженням двох послідовних хвиль напружень;  $m, A$  – коефіцієнти в рівнянні ударної стисливості.

При проведенні чисельних розрахунків виявилось, що  $k(n-1)\Delta t/A$  на декілька порядків менше одиниці, тобто двочлен в знаменнику можна розкласти в ряд, узявши два перших члена.  $n \gg 1$ , тому тиск, необхідний для утворення ударної хвилі в речовині, можна записати у вигляді:

$$p_s = \frac{2mA}{m+1} = \frac{2\rho_0 C_p^2}{m+1}. \quad (8)$$

За формулою (7) чисельно визначався тиск  $p_s$  для різних порід при швидкостях навантаження  $k = 10^{14} \div 10^{17}$  Па/с і  $\Delta t = 10^{-9} \div 10^{-17}$  с.

При тиску  $p > p_s$  генерується плоска пряма стаціонарна ударна хвиля. Коли тиск, що викликає хвилю, зменшується, тиск у фронті УХ стає меншим  $p_s$ . Дійсно, заряди, що вибухають в лабораторії, мають невеликі розміри. Тиск продуктів вибуху зростає протягом часу  $\tau \sim 0,1$  мкс, а потім починає зменшуватися за рахунок хвиль розрідження і розвантаження. Ударна хвиля швидко згасає. При зниженні тиску в порожнині вибуху ударна хвиля якийсь час продовжує розповсюджуватися за рахунок кінетичної енергії речовини за її фронтом. Коли тиск у фронті УХ досягає динамічної межі міцності речовини, вона вироджується в хвилю напружень. Оскільки параметри ударної хвилі визначаються не в точці, а на проміжку, то середній тиск, одержаний експериментально, завжди менше  $p_s$ .

Відомі експериментальні дані, що ударна хвиля в граніті утворюється при тиску  $p > 33$  ГПа, а теоретичне значення  $p_s = 37,6$  ГПа. Похибка в цьому випадку складає 12 %.

Проведено аналіз процесів, що протікають при модельних і промислових вибухах свердловинних зарядів, який дозволяє зробити висновок, що через відсутність їх фізичної подібності на моделях можна отримати тільки якісні результати, а кількісний перерахунок експериментальних результатів, одержаних на моделях, на результати, які можуть мати місце в промислових умовах, не завжди правомірний (табл. 1).

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз процесів, що протікають при вибусі свердловинного та його моделюючого зарядів

Свердловинний заряд	Заряд моделі
1. Ударна хвиля виникає не завжди і слабка	1. Завжди виникає ударна хвиля
2. Швидкість детонації ВР, як правило, менше швидкості хвилі напружень. Вектор напружень в породі виконує біля свердловини поворот на кут $\pi$	2. Швидкість детонації завжди більше швидкості хвилі напружень. На початковій стадії вибуху хвильові процеси більш інтенсивні, ніж в свердловині, а потім менш інтенсивні
3. Поле напружень має осьову симетрію	3. Поле напружень, в основному, має сферичну симетрію
4. Відношення маси ВР до маси забійки $\approx 3:1$	4. Відношення маси ВР до маси забійки $\approx 1:6$
5. Відношення розмірів зони дроблення до швидкості хвиль напружень $\sim 10^{-3}$ с	5. Відношення розмірів моделі до швидкості хвиль напружень $\sim 10^{-5}$ с. Велика роль відбитих від вільних поверхонь хвиль напружень
6. Ударна хвиля в забійці згасає	6. Забійка, в основному, вилітає під дією ударної хвилі
7. Максимальний модуль градієнта напружень в породі $\sim 10^9$ Па/м	7. Максимальний модуль градієнта напружень в матеріалі моделі $\sim 10^{13}$ Па/м
8. Порода тріщинувата, часто містить повітря або воду	8. Ефект вибуху залежить від товщини оболонки, матеріалу і повітряного проміжку між оболонкою і шпуром

Таким чином, при теоретичному розгляді поширення циліндричних ударних хвиль в ґрунті одержано співвідношення, які дозволяють, в першому наближенні, оцінити практично всі величини, що характеризують процес розповсю-

дження циліндричної ударної хвилі в ґрунті, а саме: швидкість ударної хвилі, масову швидкість породи за фронтом ударної хвилі, енергію ударної хвилі та інше. Нами також встановлено, що при розширенні порожнини вибуху в процесі генерації ударної хвилі лише половина роботи продуктів вибуху розходується на утворенні ударної хвилі. При подрібнюванні гірських порід основна частина енергії ударної хвилі іде на вторинне подрібнення порід. Мінімальний розмір частинок роздрібненої породи значно менше ширини фронту ударної хвилі. Необхідною умовою виникнення ударної хвилі у породі є створення для кожної з них тиску відповідної величини (для води –  $P_y = 535$  МПа; граніту –  $P_y = 37,6$  МПа; вапняку –  $P_y = 32,8$  ГПа; мармуру –  $P_y = 31,8$  ГПа; сухого піску –  $P_y = 50,4 - 169$  МПа (при пористості 5 – 20%); глини –  $P_y = 272 - 358$  МПа (при пористості 4 – 20%).

Для гетерогенних середовищ існує декілька порогових тисків, що викликають виникнення ударних хвиль. Наприклад, для ґрунтів: перше значення тиску – при стискуванні повітря; друге значення – при стискуванні води; третє – при стискуванні мінеральних зерен. При кожному зламі ударної адіабати речовини змінюється порогові значення тиску.

**УДК 622.831 (043.3)**

Д-р техн.наук Д.В. Яковлев,  
ст. научн. сотр. Е. В. Гончаров,  
канд. техн. наук А. Т. Карманский  
(ВНИМИ)

### **НОВЫЕ СПОСОБЫ АКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УГОЛЬНЫЕ ПЛАСТЫ И ИХ СПУТНИКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ГАЗООТДАЧИ**

У діапазоні теоретично обґрунтованих параметрів частот коливань термосейсмоакустичного впливу на газовміщуючі пласти порід наведено результати його лабораторних і натурних випробувань на шахтах Воркутинського родовища. Встановлено ефективність і безпеку процесу дегазації викидонебезпечних вугільних пластів з використанням такого джерела вібраційного випромінювання.

### **NEW WAYS TO ACTIVELY AFFECT THE COAL SEAM AND THEIR SATELLITES FOR INCREASE GAS RECOVERY**

The results of laboratory and on-site tests at Vorkuta coal-field mines are adduced for thermoseismoacoustic influence on gas-containing layers of rocks in a range of its theoretically well-founded fluctuation frequencies parameters. It is ascertained that the degasification of ejection-risky coal layers using such a source of vibrating radiation is both efficient and safe.

В течение нескольких последних десятилетий в связи с актуальностью проблемы поиска путей повышения эффективности добычи метана из угольных пластов и нефтедобычи акустическое и вибрационное воздействия на флюидонасыщенные пористые среды составляют предмет все более детального исследования [4, 5, 6]. Современные теоретические и экспериментальные разработки отечественных и зарубежных авторов, в которых анализируются подземные