

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ УДАРНИХ ХВИЛЬ В МАСИВІ ГІРСЬКИХ ПОРІД ПРИ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ЯВИЩАХ**

**<sup>1</sup>Скіпочка С.І., <sup>1</sup>Паламарчук Т. А., <sup>1</sup>Прохорець Л. В., <sup>2</sup>Курінний В.П.**

<sup>1</sup>Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, <sup>2</sup>НТУ «Дніпровська політехніка» МОН України

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ**

**<sup>1</sup>Скипочка С.И., <sup>1</sup>Паламарчук Т. А., <sup>1</sup>Прохорец Л. В., <sup>2</sup>Куринной В.П.**

<sup>1</sup>Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, <sup>2</sup>НТУ «Днепровская политехника» МОН Украины

## **INVESTIGATION OF FEATURES OF SHOCK WAVE DISTRIBUTION IN THE ROCK MASSIF AT GAS DYNAMIC PHENOMENA**

**<sup>1</sup>Skipochka S.I., <sup>1</sup>Palamarchuk T.A., <sup>1</sup>Prokhorets L.V., <sup>2</sup>Kurinnyi V.P.**

<sup>1</sup>Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of NAS of Ukraine, <sup>2</sup>NTU "Dnipro Polytechnic" MES of Ukraine

**Анотація.** При вивченні факторів ризику на вугільних шахтах, у першу чергу необхідно розглянути фактори і властивості гірського масиву, що виникають внаслідок поглиблення гірських робіт на вугільних шахтах, що призводить до одного з основних видів небезпеки – небезпеки за геодинамічними явищами (ГДЯ). Виникнення і розвиток геодинамічних явищ формується під впливом природних і технологічних факторів. Природні фактори визначають схильність гірського масиву до геодинамічних проявів або, інакше кажучи, його потенційну небезпеку за цими явищами. Можливість реалізації цієї небезпеки залежить від технологічних факторів. У числі небезпечних факторів підземного видобутку вугілля, до яких, насамперед, належать геодинамічні явища, основними є газодинамічні явища, які являють собою найбільш складні за природою і небезпечні за наслідками явища високої динамічної потужності і виділення великої кількості газу за короткий проміжок часу. Їхніми наслідками можуть бути аварії через раптові загазування і завали виробок вугіллям і породою, а також вибухи метану і вугільного пилу, руйнування кріплення виробок, uszkodження машин і механізмів, устаткування та приладів. Так як газодинамічні явища у масиві гірських порід супроводжуються виникненням процесів різноманітного характеру, то ризики від них слід враховувати при проведенні гірських робіт. При розгляданні газодинамічних явищ слід приділити увагу розповсюдженню ударних хвиль (УХ), як одному із процесів газодинаміки. Тому метою даного дослідження є вивчення особливостей розповсюдження ударних хвиль в масиві гірських порід для запобігання виникнення небезпечних наслідків. В роботі розглянуто процеси, що виникають в масиві гірських порід, небезпечному за газодинамічними явищами, при розповсюдженні ударних хвиль. При дослідженнях застосовувалися методи механіки гірських порід, механіки суцільних середовищ, газо- і термодинаміки. Проведено аналітичні дослідження процесів та чисельний аналіз отриманих результатів. Показано, що різке зростання термодинамічних параметрів при газодинамічних явищах може призвести до виникнення ударних хвиль. Встановлено, що у призабійній зоні в тріщинах, порожнинах і порах може утворюватись вибухонебезпечна повітряно-метанова суміш. При розкритті порожнин і пор можливі випадки генерування ударних хвиль у повітряно-метановій суміші, що призводять до її детонації. За несприятливих умов це може призвести до пожежі у виробці.

**Ключові слова:** фактори ризику, масив гірських порід, газодинамічні явища, ударні хвилі

**Вступ.** Відносно факторів ризику на вугільних шахтах, у першу чергу необхідно розглянути фактори і властивості гірського масиву, що виникають внаслідок поглиблення гірських робіт на вугільних шахтах, що призводять до одного з основних видів небезпеки – небезпеки за геодинамічними явищами (ГДЯ) [1], [2].

Виникнення і розвиток геодинамічних явищ формується під впливом природних і технологічних факторів. Природні фактори визначають схильність гірського масиву до геодинамічних проявів або, інакше кажучи, його потенційну небезпеку за цими явищами. Можливість реалізації цієї небезпеки залежить від технологічних факторів.

У числі небезпечних факторів підземного видобутку вугілля, до яких, насамперед, належать геодинамічні явища основними є газодинамічні явища, які являють собою найбільш складні за природою і небезпечні за наслідками явища внаслідок високої динамічної потужності і виділення великої кількості газу за короткий проміжок часу. Їхніми наслідками можуть бути аварії через раптові загазування і завали виробок вугіллям і породою, а також вибухи метану і вугільного пилу, руйнування кріплення виробок, ушкодження машин і механізмів, устаткування та приладів.

Можливість виникнення газодинамічних явищ у шахтах визначається сполученням трьох основних факторів: геологічних, гірничотехнічних і технологічних. Геологічні умови пов'язані з масштабними динамічними процесами в земній корі, тектонічною будовою гірського масиву, ступенем метаморфізму вугілля, фізичними властивостями гірських порід і покладів корисних копалин. Газодинамічна небезпека зростає із глибиною розробки родовищ. На ступінь динамічної активності гірського масиву істотно впливає технологія ведення гірських робіт. Формування і розвиток газодинамічних явищ визначають газова зональність і газова динаміка масиву на глибинах ведення гірських робіт. [3], [4].

Оскільки газодинамічні явища у масиві гірських порід супроводжуються виникненням процесів різноманітного характеру, то ризики від них слід враховувати при проведенні гірських робіт. При розгляданні газодинамічних явищ слід приділити увагу розповсюдженню ударних хвиль (УХ), як одному з процесів газодинаміки. Тому метою даного дослідження є вивчення особливостей розповсюдження ударних хвиль в масиві гірських порід для запобігання виникнення небезпечних наслідків.

**Методи досліджень.** При вирішенні поставленої задачі використані методи механіки гірських порід, механіки суцільних середовищ, газо- і термодинаміки.

**Результати досліджень.** Іноді в наукових роботах або дисертаціях розглядається захист підземних споруд від ударних хвиль, що виникають в породі при викидах. Взагалі, термін ударна хвиля часто використовується в гірничій справі. У даному дослідженні досліджуються параметри хвиль напружень, при яких виникають ударні хвилі, сильні хвилі стиску і хвилі Рімана.

У стаціонарній ударній хвилі спостерігається стаціонарний потік породи (порода розглядається, як рідина). Потік обмежений ударним стрибком, що поширюється з швидкістю  $D \approx c_l + u$ , де  $c_l$  – швидкість поздовжньої хвилі в породі;  $u$  – швидкість течії. Ширину стрибка називають шириною фронту ударної хвилі. На фронті ударної хвилі всі параметри (тиск, густина породи, температура, масова швидкість, ентропія і т.д.) виконують стрибок, а далі

залишаються сталими. Ударні хвилі, на відміну від хвиль напружень, відчують протидію породи, що визначається динамічною межею плинності [5].

$$P = ((1 + \nu)/(1 - 2\nu))\sigma_\alpha, \quad (1)$$

де  $P$  – тиск;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  $\sigma_\alpha$  – динамічна межа міцності породи на зсув.

Ширина фронту ударної хвилі в монокристалічних породах десятки нм (залежить від тиску в ударній хвилі). В полікристалічних породах – одиниці мкм. Тиск, необхідний для виникнення ударної хвилі, можна оцінити за формулою [6]:

$$P_s \approx \frac{2Am}{m+1} = \frac{2\rho_n c_l^2}{m+1}, \quad (2)$$

де  $A$ ,  $m$  – коефіцієнти ударної стисливості породи у рівнянні Тета;  $\rho_n$  – густина породи.

Результати оцінки тиску  $P_s$  приведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Значення тиску  $P_s$ , необхідного для виникнення стаціонарної ударної хвилі у породах, з визначеними значеннями  $\rho_n$ ,  $c_l$ ,  $m$ .

| Тип породи | $\rho_n$ , кг/м <sup>3</sup> | $c_l$ , м/с | $m$ | $P_s$ , ГПа |
|------------|------------------------------|-------------|-----|-------------|
| Гіпс       | 2300                         | 4500        | 4,2 | 17,91       |
| Пісковик   | 2700                         | 4500        | 4,1 | 21,44       |
| Аргіліт    | 2700                         | 4500        | 4,2 | 21,03       |
| Алевроліт  | 2600                         | 4000        | 4,3 | 15,7        |
| Вапняк     | 2600                         | 4900        | 4,2 | 24,01       |

В дійсності ударні хвилі швидко згасають. При цьому ширина фронту ударної хвилі збільшується, а тиск, масова швидкість породи, її густина, температура, приріст ентропії, об'ємна густина енергії зменшуються за часом. Зі зменшенням об'ємної густини пружної енергії збільшується розмір частинок, на які руйнується порода. Сила, що діє на ударні хвилі з боку породи зменшується до нуля. У стаціонарній ударній хвилі половина роботи, що виконує джерело хвилі, витрачається на приріст кінетичної енергії речовини. У супротивному випадку це не так.

Коли тиск у хвилі менше  $P_s$ , але значно більше границі міцності речовини, то класичні рівняння для ударної хвилі несправедливі і потрібно розглядати сильні хвилі стиску або сильні хвилі розвантаження. На фронті сильної хвилі стиску не виникає ударний стрибок, або він незначний. При дослідженні сильної хвилі стиску важливо мати залежність швидкості хвилі напружень від тиску. Залежність густини речовини від тиску зручно розглянути у формі Тета:

$$P = A((\rho_n / \rho_{0n})^m - 1), \quad (3)$$

де  $\rho_{0n}$ ,  $\rho_n$  – відповідно густина породи атмосферному тиску і тиску  $P$ .

Швидкість поширення хвиль напружень  $c_l$  дорівнює:

$$c_l = \sqrt{\frac{dP}{d\rho_n}} = \sqrt{\frac{Am}{\rho_{0n}} \left( \frac{\rho_n}{\rho_{0n}} \right)^{\frac{m-1}{2}}} = c_{0l} \left( \frac{\rho_n}{\rho_{0n}} \right)^{\frac{m-1}{2}}, \quad (4)$$

де  $c_{0l}$  – швидкість пружної хвилі при атмосферному тиску.

З урахуванням (3) швидкість дорівнює:

$$c_l = c_{0l} \left( \frac{P}{A} + 1 \right)^{\frac{m-1}{2m}}. \quad (5)$$

Результати обчислень швидкості хвиль напружень у різних породах та воді приведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Швидкості хвилі напружень у породі і воді при різних тисках

| Тип породи | Тиск, МПа           |        |        |        |        |        |        |
|------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|            | 10                  | 20     | 30     | 50     | 100    | 500    | 1000   |
|            | $c_l$ у породі, м/с |        |        |        |        |        |        |
| Гіпс       | 4501,5              | 4503,1 | 4504,6 | 4507,7 | 4515   | 4576   | 4650   |
| Пісковик   | 4500,6              | 4501,2 | 4501,9 | 4503,1 | 4506,2 | 4530,9 | 4561,5 |
| Аргіліт    | 4501,3              | 4502,6 | 4503,9 | 4506,6 | 4513,1 | 4565,1 | 4628,7 |
| Алевроліт  | 4001,6              | 4003,2 | 4004,7 | 4007,9 | 4015,8 | 4078,1 | 4154   |
| Вапняк     | 4901,2              | 4902,5 | 4903,8 | 4906,3 | 4912,5 | 4962,2 | 5023,1 |
| Вода       | 1504                | 1525   | 1545,3 | 1585   | 1679   | 2263,4 | 2789,6 |

З табл. 2 видно, що при тиску 0,8–1 ГПа у породі виникають сильні хвилі стиснення, а у воді ударні хвилі.

Початкові параметри сильної хвилі стиску в породі і воді співпадають з початковими параметрами, отриманими за формулами для ударних хвиль (як правило, сильні хвилі стиску вважають ударними хвилями). Масова швидкість породи і води визначається за формулою:

$$u = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_{0n}} \left( 1 - \frac{\rho_n}{\rho_{0n}} \right)} = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_{0n}} \left( 1 - \left( \frac{P}{A} + 1 \right)^{-\frac{1}{m}} \right)}. \quad (6)$$

Результати обчислення масової швидкості наведено у табл. 3.

Відомо, що у вугіллі метан знаходиться у сорбованому і вільному стані. Крім того, частина метану знаходиться у твердому розчині. Згідно з [7] доступний для метану об'єм дорівнює 20 % об'єму вугілля. Концентрація молекул метану знаходиться за формулою:

$$P = nkT,$$

де  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – температура;  $n$  – концентрація.

Таблиця 3 – Масова швидкість породи і води при зазначених тисках

| Тип породи | Тиск, МПа                    |        |       |        |        |         |         |
|------------|------------------------------|--------|-------|--------|--------|---------|---------|
|            | 10                           | 20     | 30    | 50     | 100    | 500     | 1000    |
|            | Масова швидкість породи, м/с |        |       |        |        |         |         |
| Гіпс       | 0,966                        | 1,93   | 2,89  | 4,82   | 9,63   | 47,64   | 94,03   |
| Пісковик   | 0,82                         | 1,645  | 2,47  | 4,1    | 8,21   | 40,69   | 80,47   |
| Аргіліт    | 0,82                         | 1,64   | 2,47  | 4,1    | 8,21   | 40,69   | 80,47   |
| Алевроліт  | 0,83                         | 1,66   | 2,49  | 4,14   | 8,28   | 41      | 81,08   |
| Вапняк     | 0,714                        | 1,428  | 2,142 | 3,568  | 7,13   | 35,4    | 70,195  |
| Вода       | 6,767                        | 13,412 | 19,94 | 32,673 | 62,829 | 253,284 | 430,798 |

При атмосферному тиску  $n = 2,415 \cdot 10^{25}$  г/м<sup>3</sup>. Для вивільнення 1 м<sup>3</sup> метану у виробку необхідно, щоб концентрація молекул в твердому розчині була  $5n$ . В цьому випадку середня відстань між молекулами метану дорівнює  $d = n^{-0,333} = 2,06$  нм. З цього випливає, що при діаметрі молекул метану 0,4 нм, у твердому розчині і вільному стані вугілля може включати лише декілька м<sup>3</sup> метану при атмосферному тиску. Основна кількість метану знаходиться у вугіллі в адсорбованому стані. При проходженні виробки, у її околі в породі формуються опорні зони. При цьому виникають зони тріщинуватості. В зонах тріщинуватості метан із сорбованого стану переходить у вільний стан.

Необхідно дослідити можливість виникнення вибухово-небезпечної суміші газів у вугіллі. Концентрація молекул повітря  $n_n$  визначається за формулою:

$$n_n = \frac{PN_A}{RT}, \quad (7)$$

де  $R$  – газова стала.

При температурі 293 К і тиску  $P = (1 \div 20)$  МПа  $n_n = (2,5 \div 50) \cdot 10^{26}$  1/м<sup>3</sup>. Концентрацію адсорбованих молекул метану  $n_{ad}$  можна оцінити за формулою:

$$n_{ad} = \frac{\rho}{2M} N_A = 2,8 \cdot 10^{27} \text{ 1/м}^3, \quad (8)$$

де  $\rho$  – густина зрідженого метану;  $M$  – молярна маса метану.

Концентрацію десорбованих молекул  $n_d$  оцінимо за формулою:

$$n_d = n_{ad} e^{-\frac{\psi}{RT}}, \quad (9)$$

де  $\psi$  – енергія десорбції метану (2 ÷ 15 кДж/моль).

При підстановці числових значень величин, отримуємо  $n_d = (0,173 \div 36,1) \cdot 10^{26}$  1/м<sup>3</sup>.

З порівняння концентрацій  $n_n$  і  $n_d$  випливає, що вибухонебезпечна суміш повітря і метану цілком можлива.

При утворенні тріщин, руйнуванні вугілля, в метані можуть виникнути ударні хвилі. Для генерування стаціонарної ударної хвилі необхідний надлишковий тиск, що визначається за формулою [8]:

$$P_s = P_0 + \frac{\pi}{2} \rho_0 c_0 \sqrt{\frac{(P_s - P_0)}{\rho_0} \left( 1 - \left( \frac{P_0}{P_s} \right)^{\frac{1}{\beta}} \right)}, \quad (10)$$

де  $P_s$  – тиск, при якому виникає стаціонарна ударна хвиля;  $P_0$  – тиск перед фронтом ударної хвилі;  $\rho_0$ ,  $c_0$  – відповідно густина газу і швидкість поширення хвиль у ньому;  $\beta$  – показник адіабати газу.

Підстановка числових значень для метану у формулу (10) дає значення  $P_s \approx 2,75 \cdot 10^5$  Па при  $P_0 = 10^5$  Па.

Параметри ударної хвилі, що виникають у газі визначаються за формулами [9]:

$$u = \frac{2\beta P}{(\beta-1)\rho_c} \left( 1 - \left( \frac{P_s}{P_0} \right)^{\frac{\beta-1}{2\beta}} \right) = \sqrt{\frac{(P_s - P_0)}{\rho_0} \left( 1 - \left( \frac{P_0}{P_s} \right)^{\frac{1}{\beta}} \right)}, \quad (11)$$

$$D = \frac{1}{\rho_0} \sqrt{(P_s - P_0) \left( \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right)} = \frac{P - P_0}{\rho_0 u},$$

де  $u$  – масова швидкість газу за фронтом ударної хвилі;  $P$ ,  $\rho$  – відповідно тиск газу і його густина;  $c$  – швидкість пружних хвиль у газі при тиску  $P$ ;  $P_0$ ,  $\rho_0$  – відповідно тиск газу і його густина перед фронтом ударної хвилі;  $\rho$  – густина газу за фронтом ударної хвилі;  $D$  – швидкість ударної хвилі;  $\beta$  – показник адіабати газу.

Визначимо параметри ударних хвиль в повітрі з вмістом метану 12 %. Густина суміші:

$$\rho_m = k\rho_1 + (1-k)\rho_a,$$

де  $k$  – об’ємна доля метану;  $\rho_1$  – густина метану при атмосферному тиску;  $\rho_a$  – густина повітря ( $T=293\text{K}$ ).

Число ступенів вільності суміші дорівнює:

$$i_m = \frac{i_1 \rho_1 k + i_a (1-k) \rho_a}{\rho_m}, \quad (12)$$

де  $i_1$ ,  $i_a$  – число ступенів вільності для молекул метану і повітря.

Швидкість пружних хвиль при тиску суміші  $P$  дорівнює:

$$c = \sqrt{\frac{\beta P}{\rho_m}}, \quad c_0 = \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{\beta-1}{2\beta}}. \quad (13)$$

Підстановка числових значень у формули дає:

- число ступенів вільності газу  $i=5,12$ ;
- показник адіабати  $\gamma=1,3906$ ;
- швидкість пружних хвиль  $c_0=350,62$  м/с;
- густина газу ( $T=293\text{K}$ )  $\rho_0=1,16$  кг/м<sup>3</sup>;

Чисельний розв'язок рівнянь (11) – (13) дозволив виявити параметри ударної хвилі, що приведені у табл. 4.

Таблиця 4 – Параметри ударної хвилі в суміші повітря – метан

| Тиск у газі $P$ , МПа | Параметри ударної хвилі |           |             |
|-----------------------|-------------------------|-----------|-------------|
|                       | $u$ , м/с               | $D$ , м/с | $P_s$ , МПа |
| 0,2                   | 88,13                   | 401,4     | 0,141       |
| 0,5                   | 185,8                   | 466,4     | 0,2         |
| 1                     | 344,75                  | 590,6     | 0,336       |
| 5                     | 459,4                   | 632,9     | 0,437       |
| 10                    | 522,4                   | 685,4     | 0,515       |
| 20                    | 596,5                   | 747,8     | 0,617       |
| 30                    | 633,9                   | 780       | 0,673       |
| 40                    | 658                     | 800       | 0,71        |

У випадку, коли в повітрі 5 % метану (при 5–12 % метану маємо вибухонебезпечну суміш) значення величин суттєво не змінюється ( $\beta=1,396$ ;  $i=5,05$ ;  $\rho_0=1,2$  кг/м<sup>3</sup>;  $c_0=345,24$  м/с).

Розглянемо окремий випадок, коли поблизу виробки знаходиться тріщина, заповнена газом, при атмосферному тиску. Нехай при розкритті тріщини вона сполучається з однією або двома макропорами чи порожнинами з газом при тиску  $P$ .

При цьому у тріщині виникають хвилі або хвиля. Необхідно оцінити тиск і температуру газу при зустрічі хвиль або поширенні хвилі в тріщині. Максимальний тиск в газі  $P_m$  можна оцінити за формулою [10]:

$$P_m = P_s \left( 1 + \frac{2\beta(P_s - P_0)}{(\beta - 1)P_s + (\beta + 1)P_0} \right), \quad (14)$$

де  $P_s$  – тиск у хвилі, що утворюється в тріщині;  $P_0$  – атмосферний тиск.

Значення температури газу в ударній хвилі при тиску  $P_s$  для повітряно-метанової суміші наведені у табл. 5.

Таблиця 5 – Температура газу в ударній хвилі при тиску  $P_s$  для повітряно-метанової суміші

|             |       |     |       |       |       |       |       |      |
|-------------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| $P_s$ , МПа | 0,141 | 0,2 | 0,336 | 0,437 | 0,515 | 0,617 | 0,673 | 0,71 |
| $P_m$ , МПа | 0,282 | 0,4 | 0,931 | 1,44  | 1,86  | 2,46  | 2,81  | 3,04 |
| $T$ , К     | 392   | 462 | 708   | 964   | 1244  | 1320  | 1562  | 1627 |

З табл. 5 випливає, що в розглянутому випадку, тиск і температура суміші достатні для гарантованого виникнення детонаційної хвилі у метаново-

повітряної суміші. При цьому температура продуктів детонації може досягати 4100 К.

**Висновки.** Різке зростання термодинамічних параметрів при газодинамічних явищах може призвести до виникнення ударних хвиль.

Встановлено, що у призабійній зоні в тріщинах, порожнинах і порах може утворюватись вибухонебезпечна повітряно-метанова суміш. При розкритті порожнин і пор можливі випадки генерування ударних хвиль у повітряно-метановій суміші, що призводять до її детонації. За несприятливих умов це може призвести до пожежі у виробці.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Зыков В. С. Факторы и свойства горного массива, определяющие вид опасности по геодинамическим явлениям / Вестник КузГТУ. 2014. № 5 (105). С. 9–17.
2. Зыков В.С., Абрамов И. Л., Торгунаков Д. В. Статистика динамических явлений в шахтах и уточнение их классификации / Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. №6. С. 297–319.
3. Півняк Г. Г. та ін. Керування ризиками в гірничодобувній діяльності. Дніпро: НГУ, 2015. 288 с.
4. Абрамов И. Л. Виды и причины газодинамических явлений на угольных шахтах / Вестник КузГТУ. 2015. № 1(105). С. 16–17.
5. Ляхов Г. М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах. М.: Недра, 1974. 192 с.
6. Куринной В. П., Гаркуша И. П. Определение давления, необходимого для возбуждения ударных волн в горных породах / Деформация и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Материалы конф. им. С.А. Христиановича, Симферополь: ТНУ, 2010. С. 196-199.
7. Булат А.Ф., Скипочка С.И., Паламарчук Т.А., Анциферов В.А. Метаногенерация в угольных пластах Днепропетровск, 2010. 325 с.
8. Куринной В.П., Гаркуша И.П. Некоторые аспекты физических процессов в породном массиве, возникающих при распространении ударных волн / Сучасні ресурсозберігаючі технології гірничого виробництва. Кременчук, 2013. Вип. 2(13). С. 26-34.
9. Физика взрыва / Под ред. К.П. Станюковича. М.: Наука, 1985. 704 с.
10. Станюкович К. П. Неустойчивые движения сплошной среды. М.: Наука, 1971. 856 с.

#### REFERENCES

1. Zikov, V.S. (2014), "Factors and properties of the rock massif that determine the type of hazard based on geodynamic phenomena", *Vestnik KuzGTU*, no. 5(105), pp. 9-17.
2. Zikov, V.S., Abramov, I.L. and Torgunakov, D.V. (2013), "Statistics of dynamic phenomena in mines and clarification of their classification", *GIAB*, no. 6, pp. 297-319.
3. Pivniak, G.G., Tabachenko, M.M., Dychkovskiy, R.O. and Phalshtynskiy, V.S. (2015), *Keruvannia ryzykamy v girnychodobuvnii diialnosti* [Risk management in mining activities], NGU, Dnipro, Ukraine.
4. Abramov, I.L. (2015), "Types and causes of gas-dynamic phenomena in coal mines", *Vestnik KuzGTU*, no. 1(105), pp. 16-17.
5. Liakhov, G.M. (1974), *Osnovy dinamiki vzryvnykh voln v gruntakh i gornykh porodakh* [Basics of the dynamics of blast waves in soil and rocks], Nedra, Moscow, SU.
6. Kurinnoj, V.P. and Garkusha, I.P. (2010), "Determination of the pressure required to excite shock waves in rocks", *Dephormatsiia i razrusheniie materialov s dephektami i dinamicheskie iavleniia v gornykh porodakh i vyrabotkakh: Materialy mezhdunarodnoi konferentsii*, Simpheropol, Ukraine, pp. 196-199.
7. Bulat, A.F., Skipochka, S.I., Palamarchuk, T.A. and Antsiperov, V.A. (2010), *Metanogeneratsiia v ugolnykh plastakh* [Coal seam methane generation], Dnipropetrovsk, Ukraine.
8. Kurinnoj V.P. and Garkusha I.P. (2013), "Some aspects of physical processes in the rock massif, arising from the propagation of shock waves", *Suchasni resursozberigaiuchi tekhnologii girnychogo vyrobnytstva*, no. 2(13), pp. 26-34.
9. Staniukovich, K.P. (ed) (1985) *Phizika vzryva* [Explosion physics], Nauka, Moscow, SU.
10. Staniukovich, K.P. (1971), *Neustanovivshiesia dvizheniia sploshnoi sredy* [Unsteady motion of a continuous medium], Nauka, Moscow, SU.

#### Про авторів

**Скіпочка Сергій Іванович**, доктор технічних наук, професор, завідувач лабораторії фізики та геомеханічного моніторингу масивів гірських порід, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, [skipochka@ukr.net](mailto:skipochka@ukr.net).



**Паламарчук Тетяна Андріївна**, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник у лабораторії фізики та геомеханічного моніторингу масивів гірських порід, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, [tp208\\_2008@ukr.net](mailto:tp208_2008@ukr.net)

**Прохорець Лілія Вікторівна**, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник у лабораторії фізики та геомеханічного моніторингу масивів гірських порід, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, [prohoreclv@gmail.com](mailto:prohoreclv@gmail.com)

**Курінний Володимир Павлович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри фізики, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (НТУ «ДП»), Дніпро, Україна, [nmu@nmu.org.ua](mailto:nmu@nmu.org.ua).

### About the authors

**Skipochka Sergiy Ivanovich**, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Head of the Laboratory of Physics and Geomechanical Monitoring of Rock Massif, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of NAS of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, [skipochka@ukr.net](mailto:skipochka@ukr.net).

**Palamarchuk Tetiana Andriivna**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc), Senior Researcher, Principal Researcher in the Laboratory of Physics and Geomechanical Monitoring of Rock Massif, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of NAS of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, [tp208\\_2008@ukr.net](mailto:tp208_2008@ukr.net)

**Prokhorets Liliia Victorivna**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher in the Laboratory of Physics and Geomechanical Monitoring of Rock Massif, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of NAS of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, [prohoreclv@gmail.com](mailto:prohoreclv@gmail.com)

**Kurinnyi Volodymyr Pavlovich**, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Professor of Physics Cathedra, National Technical University "Dnipro Polytechnics"(NTU "D P"), Dnipro, Ukraine. [nmu@nmu.org.ua](mailto:nmu@nmu.org.ua).

**Аннотация.** При изучении факторов риска на угольных шахтах, в первую очередь необходимо рассмотреть факторы и свойства горного массива, возникающие вследствие углубления горных работ на угольных шахтах, которые приводят к одному из основных видов опасности – опасности по геодинамическим явлениями (ГДЯ). Возникновение и развитие геодинамических явлений формируется под влиянием природных и технологических факторов. Природные факторы определяют склонность горного массива к геодинамическим проявлениям или, иначе говоря, его потенциальную опасность по этим явлениям. Возможность реализации этой опасности зависит от технологических факторов. В числе опасных факторов подземной добычи угля, к которым, прежде всего, относятся геодинамические явления, основными являются газодинамические явления, которые представляют собой наиболее сложные по природе и опасные по результатам явления высокой динамической мощности и выделение большого количества газа за короткий промежуток времени. Их последствиями могут быть аварии из-за внезапной загазованности и завалов выработок углем и породой, а также взрывы метана и угольной пыли, разрушение крепления выработок, повреждения машин и механизмов, оборудования и приборов. Так как газодинамические явления в массиве горных пород сопровождаются возникновением процессов различного характера, то риски от них следует учитывать при проведении горных работ. При рассмотрении газодинамических явлений следует уделить внимание распространению ударных волн (УВ), как одному из процессов газодинамики. Поэтому целью данного исследования является изучение особенностей распространения ударных волн в массиве горных пород для предотвращения возникновения опасных последствий. В работе рассмотрены процессы, возникающие в массиве горных пород, опасному по газодинамическими явлениями, при распространении ударных волн. При исследованиях применялись методы механики горных пород, механики сплошных сред, газо- и термодинамики. Проведены аналитические исследования процессов и численный анализ полученных результатов. Показано, что резкий рост термодинамических параметров при газодинамических явлениях может привести к возникновению ударных волн. Установлено, что в призабойной зоне в трещинах, пустотах и порах может образовываться взрывоопасная воздушно-метановая смесь. При раскрытии полостей и пор возможны случаи генерирования ударных волн в воздушно-метановой смеси, приводящие к ее детонации. При неблагоприятных условиях это может привести к пожару в выработке.

**Ключевые слова:** факторы риска, массив горных пород, газодинамические явления, ударные волны

**Annotation.** When studying risk factors in coal mines, it is necessary, in the first place, to consider factors and properties of the rock massif occurred with the deepening of mining operations in the coal mines, and determine one of the main types of danger: risk of geodynamic phenomena. The geodynamic phenomena occur and develop under the influence of natural and technological factors. Natural factors determine the rock massif proneness of to geodynamic manifestations or, in other words, its potential danger due to these phenomena. Occurrence of this danger depends on technological factors. Among the dangerous factors of underground coal production to which primarily belong the geodynamic phenomena, the main ones are gas-dynamic phenomena, which are the most complex by their nature and dangerous by consequences due to high dynamic power and release of great amount of gas during a short period of time. Their consequences can be accidents due to sudden gassing and blockage of workings by coal and rock,

explosions of methane and coal dust, destruction of the roadway supports, damage of machines and mechanisms, equipment and devices. As the gas-dynamic phenomena in the rocks massif are accompanied by occurrence of various processes differed by their nature, therefore, risks caused by them should be taken into account at mining operations. When considering the gas-dynamic phenomena attention should be paid to the shock wave propagation, as it is one of the gas dynamic processes. Therefore, purpose of this research was to study specific features of the shock wave propagation in the rock massif in order to prevent dangerous consequences. In this article, the authors consider the processes which occur in the rock massif prone to dangerous gas-dynamic phenomena at the shock wave propagation. The methods of rock mechanics, mechanics of continuous media, gas and thermodynamics were used in the research. Analytical researches of processes and numerical analysis of the received results were carried out. It is shown that a sharp increase of thermodynamic parameters under the action of gas-dynamic phenomena can lead to occurrence of the shock waves. It is further established that an explosive air-methane mixture can be formed in cracks, cavities and pores of the face area. At opening the cavities and pores, cases of shock waves formation in air-methane mixture leading to its detonation are possible. Under adverse conditions, this phenomenon can lead to a fire in the roadway.

**Key words:** risk factors, rock massif, gas-dynamic phenomena, shock waves

*Стаття надійшла до редакції 31.08. 2020*

*Рекомендовано до друку члю-корю НАН України О.П. Круковським*