

УДК 622.831.327

<https://doi.org/10.33271/crpnmu/60.093>© С.П. Мінеєв¹, С.Ю. Макеєв¹, І.Б. Беликов², П.М. Самопаленко³, А.М. Головко⁴¹ Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна² Центральний штаб Державної воєнізованої гірничорятувальної служби у вугільній промисловості України, Мирноград, Україна³ Восьмий воєнізований гірничорятувальний загін, Павлоград, Україна⁴ Десятий воєнізований гірничорятувальний загін, Мирноград, Україна

ПИТАННЯ МОЖЛИВИХ ЗАЙМАНЬ МЕТАНОПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ В ШАХТІ ЗА РАХУНОК РЕАЛІЗАЦІЇ МЕХАНОЕЛЕКТРИЧНИХ І П'ЄЗОЕФЕКТІВ ПРИ ВИЙМЦІ ВУГІЛЛЯ

© S. Mineev¹, S. Makeiev¹, I. Belikov², P. Samopalenko³, A. Golovko⁴¹ Institute of Geotechnical Mechanics Named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine² The Central Headquarters of the State Paramilitary Mine Rescue Service of Coal Industry of Ukraine, Mirnograd, Ukraine³ The Eighth Militarized Mine-Rescue Detachment, Pavlograd, Ukraine⁴ The Tenth Militarized Mine-Rescue Detachment, Mirnograd, Ukraine

ISSUES OF POSSIBLE IGNITIONS OF METHANE-AIR MIXTURE IN THE MINE DUE TO THE IMPLEMENTATION OF MECHANOELECTRIC AND PIEZOELECTRIC EFFECTS DURING COAL MINING

Мета. Дослідження та обґрунтування можливих причин виникнення займань метаноповітряної суміші при проходці виробок і виймці вугілля в шахтах.

Методи дослідження. Для обґрунтування причин зародження і розвитку газодинамічних явищ з подальшим займанням метану у вугільних шахтах виконаний аналіз фізичних і математичних моделей цього процесу. Розглянуто термодинамічний стан гірського масиву в тензорному вигляді для лагранжевих координат. Виконана оцінка приросту ентропії елемента гірського масиву не тільки за рахунок зміни його механічних властивостей, але і за рахунок протікання в ньому термоелектричних явищ.

Результати. Обґрунтовано, що швидкість протікання в гірському масиві процесів, пов'язаних зі зміною ентропії визначається не тільки його механічними властивостями, але так само залежить від термоелектричних явищ. Отримала подальший розвиток гіпотеза займання метаноповітряної суміші за рахунок п'єзоелектричного ефекту обумовленого деформаціями зерен кварцу під дією зовнішнього тиску. Показано, що береги тріщин у матеріалі, якій руйнується, являють собою потенційні полюси для проковзування між ними мікроплазмових розрядів при пробі вуглеводневого газу. Виконана оцінка швидкості росту тріщин в одиниці об'єму масиву та обґрунтовано можливість управління цим процесом за рахунок зниження коефіцієнту, що характеризує накопичення пружної енергії в області вершини тріщини. Запропонована фізико-хімічна обробка вугільного пласта, яка збільшує критичне значення коефіцієнта інтенсивності напружень у 3-6 разів, значно підвищуючи стійкість привибійної частини масиву.

Наукова новизна. Встановлено якісну залежність питомої швидкості росту концентрації тріщин в одиниці об'єму від часу, яка показує що існує можливість понизити вірогідність лавиноподібного зростання тріщин шляхом зменшення коефіцієнту, що характеризує накопичення пружної енергії в області вершини тріщини.

Практична значимість. Запропоновані заходи, які будуть включені в рекомендації по запобіганню займань метаноповітряної суміші при проходці виробок і виїмці вугілля вибухо- та пожежонебезпечного пласта.

Ключові слова: метаноповітряна суміш, газодинамічні явища, мікронарушеність, п'єзоелектричний ефект, утворення тріщин.

Вступ. При веденні гірничих робіт на великих глибинах однією з важливих проблем є виникнення таких негативних динамічних явищ, як викиди вугілля, породи і газу. Вважається загальноновизнаним [1-4], що ймовірність реалізації газодинамічних явищ визначається появою критичних величин тріщинуватості, газонасиченості, напруженого стану пласта, швидкості проведення виробок, а також характеристик, що визначають структуру і склад гірських порід. Як показано в [4], наявність цих факторів є необхідною, але недостатньою умовою переходу потенційної енергії масиву в кінетичну.

Давно назріла необхідність для більш глибокого осмислення процесів, що протікають під землею, із залученням наукових напрямків, які активно розвиваються. В складних умовах видобутку вугілля на великих глибинах прогноз і контроль займання метану не повинен використовуватися однобічно, а в комплексі з іншими методами, які спільно охоплюють весь діапазон акустичних і електромагнітних коливань, властивих потривоженому гірському масиву.

Актуальність досліджень. Питаннями встановлення причин зародження і розвитку газодинамічних явищ з подальшим займанням метану у вугільних шахтах займалися багато вчених [5-13]. Аналіз практики ведення гірничих робіт показує, що існує досить багато причин, які призводять до реалізації вибухів метаноповітряних сумішей у вугільних шахтах, які надалі нерідко призводять до пожеж [10-12]. Тому слід визнати складність проблеми виникнення та еволюції займання метану як з точки зору побудови адекватних фізичних і математичних моделей, так і з точки зору розробки технологій безпечного видобутку вугілля.

Останнім часом, поряд із звичайними технічними причинами займання метану: вогневі і вибухові роботи, куріння, іскріння (фрикційне, електростатичне та ін), самозаймання, пневмоенергетика шахти, шарові скупчення метану, атмосферна електрика, наявність ацетилену, п'єзоефекти та ін., набули поширення наступні гіпотези та фізичні моделі займання метану і супутніх йому газодинамічних явищ [14, 15]:

- гіпотеза сплесків метану при збільшенні кількості провітрюваного повітря;
- гіпотеза сплесків метану при зміні аеродинамічного опору системи лава – вироблений простір;
- гіпотеза видавлювання метану водою;
- гіпотеза аеродинамічного взаємозв'язку діючих виробок і погашених просторів;
- гіпотеза збільшення метанообільності за рахунок прихованого суфляру;
- гіпотеза імпульсного виділення метану з вугільного пласта;
- гіпотеза міграцій метану в зонах тимчасового опорного тиску у вугільному пласті;

- гіпотеза імпульсного виділення метану з підроблених порід другої (верхній) основної покрівлі та тектонічних порушень;
- гіпотеза утворення і займання ацетилену в системах вугілля – метан;
- геологічна модель, внаслідок багаторазових тектонічних рухів земної кори;
- геомеханічна модель, внаслідок втрати стійкості привибійної зони вугільного пласта;
- модель формування природно-техногенного вогнища небезпеки займання метану в привибійній зоні вугільного пласта;
- модель руйнування вогнища небезпеки займання метану в умовах геологічних порушень;
- термобарогеохімічна модель займання метану при саморуйнуванні системи «вугілля-газ» і вивільнення газу з мікро дефектів;
- кластерно-синергетична нелінійна еволюційно-структурна модель займання метану у вугільному масиві;
- термодинамічна модель утворення та еволюції зон запалення метану;
- імітаційна модель колапсу зони запалення метану у вугільному масиві і цілий ряд інших моделей [10, 16, 17].

Таке різноманіття існуючих на сьогоднішній день моделей і гіпотез говорить як про складності, так і недостатню вивченість процесів, що відбуваються при різних газодинамічних явищах та в зонах запалення метану. Тому дослідження та обґрунтування можливих причин виникнення займань метано-повітряної суміші при проходці виробок і виїмці вугілля в шахтах продовжують залишатися важливою і актуальною задачею, рішення якої наблизить практику до забезпечення безпеки роботи шахтарів у шахтах небезпечних по газодинамічним явищам і вибухам метаноповітряної суміші.

Метою роботи є дослідження та обґрунтування можливих причин виникнення займань метаноповітряної суміші при веденні гірничих робіт.

Основна частина. Перехід складнонапруженого гірського масиву в рухомий стан здійснюється в тому випадку, коли швидкості протікання внутрішніх процесів, пов'язаних зі зміною ентропії, значно превалюють над швидкостями зовнішнього впливу на масив. При цьому система з рівноважного стану переходить в рухоме за законами нелінійної термодинаміки незворотних процесів.

Розглянемо рівняння стану елемента гірського масиву в тензорному вигляді для лагранжевих координат ξ [18-20]:

$$\frac{d_{\xi}u}{d\tau} = T \frac{d_{\xi}u}{d\tau} + \frac{1}{\rho} \sigma^T : \frac{d_{\xi}\gamma}{d\tau} + \frac{1}{\rho} \tau^T : \frac{d_{\xi}\chi}{d\tau} + \sum_{k=1}^{N-1} \mu^{(k)} : \frac{d_{\xi}C^{(k)}}{d\tau}, \quad (1)$$

де T – температура; u – внутрішня енергія елемента масиву; $\sigma^T : \frac{d_{\xi}\gamma}{d\tau}$ і $\tau^T : \frac{d_{\xi}\chi}{d\tau}$ –

дворазове внутрішнє множення тензорів напружень і моментних напружень на тензори деформації γ і χ , які виражаються через вектори переміщення і повороту: $\gamma = \nabla u + g \times w$, $\chi = \nabla w$; ρ – щільність; $\mu^{(k)}$ – потенціал Гибса; $C^{(k)}$ – концентрація речовини; g , w – вектори базису.

Внутрішня енергія u як функція своїх характеристичних змінних $S, \gamma, \chi, C^{(k)}$, включаючи і ентропію S , є потенціалом, а часткові похідні:

$$\begin{aligned} T &= \left(\frac{\partial u}{\partial S} \right)_{\gamma, \chi, C^{(k)}}; & \sigma &= \rho \left(\frac{\partial u}{\partial S} \right)_{S, \chi, C^{(k)}}; \\ \tau &= \rho \left(\frac{\partial u}{\partial \chi} \right)_{S, \gamma, C^{(k)}}; & \mu^{(k)} &= \left(\frac{\partial u}{\partial C^{(k)}} \right)_{S, \gamma, \chi} \end{aligned}$$

– є рівняння стану.

Виключимо з (1) диференціали $\frac{d_\xi u}{d\tau}$ і $\frac{d_\xi C^{(k)}}{d\tau}$ за допомогою балансових рівнянь [18, 19], враховуючи наявність джерел потужністю $\rho \theta^{(k)}$:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial \tau} &= \sigma^T : (\nabla u + g \times w) + \tau^T : \nabla w - \nabla J^{(q)} \\ \rho \frac{d_\xi C^{(k)}}{d\tau} + \nabla J^{(k)} &= \rho \theta^{(k)}. \end{aligned}$$

Одержимо рівняння для зміни ентропії S :

$$T\rho \frac{d_\xi S}{d\tau} = -\nabla J^{(q)} + \sum_{k=1}^{N-1} \mu^{(k)} : (\nabla J^{(k)}), \quad (2)$$

де ∇ – набла оператор, $J^{(q)}, J^{(k)}$ – термодинамічні потоки.

Як видно з (2) виникнення ентропії повністю контролюється термодинамічними потоками $J^{(q)}, J^{(k)}$ і силами, що характеризують причини їх виникнення та інтенсивність протікання термодинамічних процесів.

У загальному випадку, відшукування в явному вигляді зазначених потоків і сил є складною задачею і не вирішується в рамках термодинаміки незворотних процесів. Введення в рівняння (2) додаткових сил і потоків (наприклад, електростатичних сил) накладає на кінетичний потенціал основну вимогу інваріантності для рівняння процесу. При цьому, як показано в [18], кінетичний потенціал може пов'язувати термодинамічні сили і потоки різної тензорної валентності.

З іншого боку, виходячи з симетрії кінетичних коефіцієнтів матриці (співвідношення взаємності Онсангера), можна записати загальне рівняння для локального приросту ентропії в одиницю часу [20, 21] з урахуванням теплових і електричних потоків:

$$\frac{d_\xi S}{d\tau} = \frac{1}{T} \left\{ (J, -\frac{1}{T} \text{grad } T) + (j, E + T \text{grad } \frac{\varepsilon}{T \cdot e}) \right\}, \quad (3)$$

де J – тепловий потік; j – щільність струму; E – напруженість електричного поля; $\varepsilon = \mu/N_A$ – хімічний потенціал; N_A – постійна Авогадро; e – внутрішня енергія.

Таким чином, з (2) і (3) видно, що приріст ентропії елемента гірського масиву визначається не тільки його механічними властивостями, але так само залежить від протікання в ньому термоелектричних явищ.

Введення в загальне рівняння Гіббса термодинамічних потоків, пов'язаних з термоелектричними явищами, обґрунтовується тим фактом, що в більшості викидонебезпечних гірських порід зосереджено 50-70 % зерен кварцу [4, 22, 23],

для яких характерна наявність існування прямого і зворотного п'єзоелектричного ефекту під дією зовнішнього тиску [24, 25].

Уявімо тріщину, заповнену вуглеводневим газом (наприклад, метаном) як конденсатор з ізольованими «берегами», тобто при виникненні поляризації заряд не може стікати по стінці тріщини. Тоді напруженість поля і деформацію можна оцінити за формулами:

$$E = -\frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} \sigma_m \text{ та } \xi = \left(\frac{1}{M} - \frac{q^2}{\varepsilon \varepsilon_0} \right) \sigma_m . \quad (4)$$

де E – напруженість електричного поля; ξ – деформація кристалів кварцу; q – п'єзоелектрична постійна; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{12}$ Ф/м; σ_m – напруження стиснення або розтягування; M – модуль Юнга кварцу.

Оцінка величини електричного поля (при $M = 7,85 \cdot 10^{10}$ Н/м², $q = 2,1 \cdot 10^{12}$ А·с/Н, $\sigma_m \sim 20\text{-}30$ МПа, $\varepsilon = 13$ для кварцу) показала, що в залежності від навантаження (величини гірського тиску) напруженість поля лежить в діапазоні величин $10^5\text{-}10^6$ В/м, тобто під дією механічних напружень в 0,1 МПа виникає різниця потенціалів ~ 60 В. Кварц по своїй природі не розчинний у воді (твердість по Моосу ~ 7), стійкий до дії ряду кислот, плавиться при 1700 °С (при 573 °С відчуває фазовий перехід, залишаючись п'єзоелектриком з симетрією 622), володіє малим тепловим розширенням, низькою електропровідністю ($\sim 10^{-11}\text{-}10^{-15}$ Ом⁻¹·см⁻¹) і при полях $10^5\text{-}10^6$ В/м, в свою чергу, деформуватися на величину (20-60) мкм, що в елементах гірського масиву породжує зворотний п'єзоефект.

На наш погляд, особливу роль в утворенні і працездатності потенційних полюсів грають зерна кварцу, пов'язані з виникненням прямого і зворотного п'єзоелектричного ефекту в гірському масиві. Є різні думки про відсотковий вміст зерен кварцу у вугіллі і породах [4, 26-28]. Особливої уваги заслуговують зони геологічних порушень, де кварцові уламки можуть потрапляти в вугільну речовину в результаті їх міграції при деформаційних процесах на кордонах вугільного пласта з породами покрівлі і підшви. Вважається, що кількість і розподіл цих зерен у вуглепородному матеріалі менш важливо, ніж позиційне розташування їх по відношенню один до одного. Останнє відіграє не останню роль при розв'язуванні раптових викидів вугілля і газу при веденні гірничих робіт.

У свою чергу наявність блукаючих стохастичних електричних полів, обумовлених деформаціями кварцу, в елементах напруженого масиву, що охоплює вміщуючими гірськими породами і вугілля, породжує ймовірність з одного боку – пробую вуглеводневого газу (метану), а з іншого – виникнення зрушення і кручення кристалів один щодо одного. Це сприяє появі додаткового потоку тепла в результаті тертя між кристалами.

Пробій вуглеводневих газів в тріщинах і порах напруженого гірського масиву обумовлений лавинним механізмом переносу заряду електронами і позитивними іонами. Слід зазначити, що при малих міжелектродних відстанях (діаметрах тріщин ~ 1 мм) і великих напруженостях електричного поля $\sim 10^6$ В/м прикатодний шар заповнює майже весь простір між електродами і струм переноситься

виключно іонами [29]. Величину струму між електродами, можна оцінити за формулою Томпсона:

$$i = 3 \cdot 10^{-3} \sqrt{k_0^{1/2} V (\alpha \cdot N^2)^{3/2}}, \quad (5)$$

де V – напруга між електродами; k_0 – рухливість позитивних іонів; α – коефіцієнт рекомбінації; N – концентрація позитивних іонів; $\alpha \cdot N^2$ – швидкість іонізації.

Оцінка густини струму для тріщин ~ 1 мм, заповнених метаном (при $k_0 = 10^{-8}$, $\alpha \sim 10^{-10}$, $N = 10^{11}-10^{12}$ см $^{-3}$, $V \sim 3-4$ В) [30], показала, що вона може лежати в діапазоні величин $\sim 10^3-10^4$ А/см 2 .

При таких густинах струму за рахунок джоулівського тепла реалізується мінімальна енергія запалення метану (~ 4 МДж) і подальше його фільтраційне горіння. Запасеного тепла достатньо для випаровування рідини в порах і тріщинах масиву. Розрахунки показують, що величини тисків при мікродетонаціях і випаровуванні рідини в напруженому масиві досягають значень, що перевищують на порядок зовнішній тиск.

Крім того, від джоулівського тепла і тепла, отриманого в екзотермічних реакціях (протікають при пробі в метані), відбувається нагрів газу порового простору, який, інтенсивно розширюючись в об'ємі, прагне вийти назовні по порах і тріщинах. В результаті високого тиску газу по тріщинах і порах переміщуються з великими швидкостями, здійснюючи при цьому перенесення вуглепородної речовини.

При цьому одні пори збільшуються в розмірах (якщо виникаючі напруження перевищують межу міцності гірської породи), інші пори, з'єднуючись між собою, утворюють розгалужену мережу тріщин, що призводить до зростання ступеня мікропорученості середовища. Її зростання пов'язане, виходячи з формул (1) і (2), з потоками масопереносу і тепла.

Якщо стадія руйнування випереджає стадію зрощування тріщин у вугільно-породному середовищі, то береги тріщин, що змінюють своє взаєморозташування у матеріалі, який кришиться, являють собою потенційні полюси для проковзування між ними мікроплазмових розрядів, що з'єднуються в один лавиноподібний потік [31-33].

Таким чином, електрофізичні процеси, пов'язані з виникненням випадкових електричних полів, призводять до формування у гірських породах зазначених мікроплазмових утворень, які в свою чергу створюють розгалужені зони підвищеної силової напруженості, так звані перколяційні кластери. Їх інтенсивність, час створення і геометричні розміри визначають величину ймовірності виходу газу на вільну поверхню гірничого масиву, що супроводжується появою і поширенням ударних хвиль, як в рудниковій атмосфері, так і в твердій фазі.

Оцінимо величину потоку газу, яка буде пропорційна кількості плазмових кластерів, які утворюються під дією електричних полів в елементах гірського масиву. Загальновідомо, що поширення хвиль в плазмі визначається її діелектричними властивостями, які в загальному випадку описуються з допомогою тензора діелектричної проникності

$$\varepsilon_{\alpha\beta} = \delta_{\alpha\beta} + \frac{4\pi i}{\omega} \sigma_{\alpha\beta}(k, \omega), \quad (6)$$

де k і ω – відповідно, хвильовий вектор і частота хвиль в плазмі; $\delta_{\alpha\beta}$ – символ Кронекера; $\sigma_{\alpha\beta}(k, \omega)$ – тензор провідності; $\alpha, \beta = 1, 2, 3$.

Для виникнення газодинамічного явища необхідно, щоб частота коливань плазми, що входить в (6), перевищувала частоту коливального процесу при лавиноподібному утворення дефектів, що приводить до створення магістральної тріщини. Згідно досліджень [34], умови розвитку останньої в часі оцінюються виразом

$$K = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_2}^{t_1} \text{sgn}(\omega_{\text{МГН}}(t)) dt, \quad (7)$$

де K – безрозмірний коефіцієнт, що характеризує накопичення пружної енергії в області вершини тріщини; t_1, t_2 – час початку і кінця процесу утворення тріщини; $\omega_{\text{МГН}}(t)$ – миттєва частота, яка визначається за допомогою перетворення Гільберта, яке дозволяє за даними спостережень отримувати залежності зміни миттєвої частоти і фази пружних коливань у процесі розвитку тріщини; $\text{sgn}(x) = 1$ – коли x монотонно убиває, $\text{sgn}(x) = 0$ – коли x монотонно зростає.

Довжина тріщини, що утворюється, обчислюється наступним чином:

$$L = KV_R(t_2 - t_1), \quad (9)$$

де V_R – швидкість розвитку магістральної тріщини.

Саме умови утворення магістральної тріщини можуть стати вирішальним чинником, пов'язаним з необоротністю процесу руйнування, якій дає можливість ефективного контролю зміни напружено-деформованого стану гірських порід [28, 35].

Зростання рівня кількості тріщин $N(t)$ обмежується деяким максимальним значенням величини $b = N_{\text{max}}$ при $\rho \rightarrow 0$ (де N_{max} – максимально можлива величина $N(t)$).

Виберемо в якості закону відносну швидкість зростання концентрації тріщин в одиниці об'єму $n(t) = N(t)/V$ (где V – об'єм), як

$$\frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dt} = K(b - n). \quad (9)$$

В цьому випадку відносна швидкість буде не постійною величиною, а лінійною функцією від $n(t)$. Розділимо змінні і візьмемо інтеграл від обох частин рівняння (9),

$$\int \frac{dn}{n(b-n)} = \frac{1}{b} \int \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{b-n} \right) dn = \frac{1}{b} \ln \frac{n}{b-n}. \quad (10)$$

Рішення рівняння (10) запишеться у вигляді:

$$\frac{1}{b} \ln \frac{n}{b-n} + \frac{1}{b} \ln a = Kt, \quad (11)$$

де постійна $C = -\frac{1}{b} \ln a$ (a – величина, що характеризує деякий початковий рівень розвитку тріщин, і визначається з початкових умов при $t = 0, a = n_0$).

В результаті перетворень (11) отримаємо остаточну формулу для визначення $n(t)$:

$$n(t) = \frac{n_{max}}{1 + n_0 e^{-n_{max} K t}} \quad (12)$$

Лінія, яка визначається рівнянням (12) є сигмоїда (логістична крива). У початковий момент часу розвитку тріщин, коли $n(t) \ll n_{max}$, вона практично збігається з експонентою $n(t) = n_0 e^{n K t}$. Прямі $n = n_{max}$ і $n = 0$ служать асимптотами логістичної кривої (рис. 1). З графіка випливає, що існує такий проміжок часу, при якому відбувається різке зростання кількості тріщин. Кут нахилу сигмоїди залежить від безрозмірного коефіцієнта K . Для зменшення ймовірності лавиноподібного росту тріщин в одиниці об'єму необхідно зменшити коефіцієнт K , що характеризує накопичення пружної енергії в області вершини тріщини, завдяки чому графік стане більш пологим.

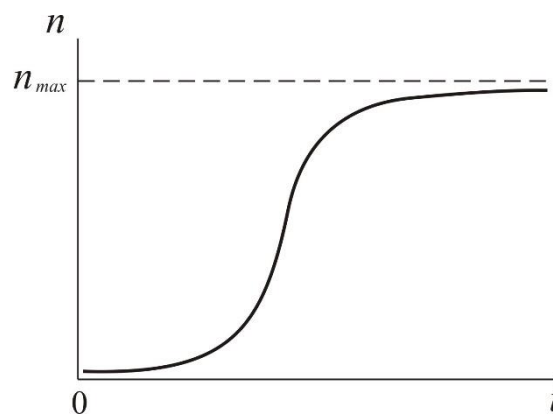


Рис. 1. Логістична крива залежності концентрації тріщин в одиниці об'єму від часу

Як видно, утворення згаданих вище перколяційних кластерів істотно залежить від темпу формування тріщин і функції їх розподілу за розмірами.

Електростатичний механізм формування мікроплазмових утворень, що ініціюють викиди вугілля і порід, можна коротко представити наступним чином. Переміщення порід під дією зовнішніх сил формує електростатичні і теплові поля за рахунок прямого і зворотного п'єзоефекту і внутрішнього тертя в масиві. Виникнення пробою в метані і його фільтраційне горіння призводить до створення нерівноважних напружених зон (перколяційних кластерів), інтенсивність утворення яких і є відповідальною за поширення мікроударних хвиль, що, в свою чергу, ініціює викид метану, його вибух і займання.

В якості основної оцінки стійкості привибійної частини вугільного пласта передбачається використовувати критичне значення коефіцієнта інтенсивності напружень K , перевищення якого призводить до втрати рівноваги у зазначеній зоні і бурхливому руйнуванню [23, 31]. Він дозволяє впливати на величини параметрів у виразах (1) і (2), так як безпосередньо залежить від діелектричної проникності порід, модуля пружності, навантаження, в'язкості матеріалу, його чутливості до зовнішнього електрофізичного впливу, так і до того, що виникає зсередини.

Згідно висновків [31], змінити K на величину, що перешкоджає переходу стану масиву стадії предразрушення в стадію плазмового динамічного явища, здатна фізико-хімічна обробка (ФХО). Внаслідок її використання нормальні і дотичні напруження в площинах, перпендикулярних площині пласта, змінюються незначно або не змінюються зовсім. Більш ніж у два рази, зменшуються дотичні напруження в площині вугільного пласта. ФХО збільшує критичне значення коефіцієнта інтенсивності напружень у 3-6 разів, значно підвищуючи стійкість привибійної частини масиву. Оскільки коефіцієнт інтенсивності напружень лінійно залежить від зовнішніх зусиль, ФХО пласта при інших рівних умовах призводить до зростання в стільки ж разів порогу критичних навантажень.

Як уявляють автори [28, 36-38] крихке руйнування гірських порід, що супроводжується електромагнітним випромінюванням в діапазоні частот від десятків кілогерц до десятків мегагерц і амплітудою напруженості електричної складової поля від часток мікрвольт на метр до сотень вольт на метр в залежності від розмірів руйнувань і властивостей порід, що руйнуються. Такі електромагнітні явища обумовлені різними за своєю природою фізичними процесами, що протікають в зоні концентрації напружень і, як наслідок, призводять до можливості утворення електричного пробоя поблизу вершини тріщини між її берегами. Отже, передбачається можливість реалізації у вироблених просторах при певних умовах виникнення температурного імпульсу шляхом реалізації п'єзоелектричного ефекту, який може бути достатнім для займання метаноповітряної суміші при веденні гірничих робіт на виїмкових дільницях шахти.

Особливий інтерес представляє собою гіпотеза [39] сутність якої полягає в тому, що, на думку авторів, вогнище ендогенного самозаймання вугілля утворюється тоді, коли шахтна атмосфера потрапляє в оголення пласта по тріщині, з'єднаної з іншою тріщиною, за якої під тиском йде потік флюїдів із зони опорного тиску. Ця інша тріщина пов'язана з робочим простором гірничої виробки, і з-за наявності в рудниковій атмосфері кисню і недостатнього відведення тепла, наприклад, у куполах гірських виробок, у місці з'єднання тріщин відбувається окислення вугілля, накопичення тепла, яке закінчується самозайманням.

Необхідно відзначити, що при розслідуванні низки аварій, пов'язаних з вибухами метану, нерідко експерти не можуть однозначно трактувати її причини [10, 35]. Зрозуміло, що для вибуху необхідно підвищений вміст метану, а ось джерело займання при розслідуваннях не завжди буває однозначним. Як вважають автори роботи [37], існує можливість займання метаноповітряної суміші від п'єзоелектричного ефекту. Причому, на їх думку, ключовими факторами є параметри пробійних напруг і умови існування такого пробоя для оцінки займання метаноповітряної суміші в умовах руйнування гірських порід.

Так, наприклад, при розслідуванні аварії на шахті «Краснолиманська» було встановлено [40], що джерелом займання метану стало обвалення і тертя пісковику по пісковіку по площі зсуву розривного геологічного порушення, яке сталося через активізацію процесу посадки порід покрівлі у виробленому просторі.

Висновки. При оцінці можливих займання метаноповітряної суміші необхідно враховувати термоелектричні явища, які протікають в гірському масиві та виникають через деформації зерен кварцу, присутнього в гірській породі.

В результаті різкого знеміцнення гірських порід відбуваються нелінійні складно контрольовані плазмові ефекти. Деформаційні зрушення ініціюють в масиві електромагнітне поле з широким діапазоном частот. При певному співвідношенні температурних і силових навантажень змінюється структура, мінеральний склад, а також збільшується інтенсивність деяких систем тріщин у вугіллі і породах. Тертюві берега кожної тріщини являють собою потенційні полюси для проковзування між ними мікроплазмових розрядів, що з'єднуються в один лавиноподібний потік.

Виконана оцінка швидкості росту тріщин в одиниці об'єму масиву та обґрунтовано можливість керування цим процесом за рахунок зниження коефіцієнта, що характеризує накопичення пружної енергії в області вершини тріщини.

Розроблено пропозиції щодо виключення виникнення в шахтах при веденні гірничих робіт деяких явищ, що призводять до вибухів.

Перелік посилань

1. Забигаило, В.Е. Лукинов, В.В. & Широков, А.З. (1983). *Выбросоопасность горных пород Донбасса*. Киев: Наукова думка.
2. Минеев, С.П. (2016). *Прогноз и предотвращение выбросов угля и газа на шахтах Украины*. Мариуполь: Східний видавничий дім.
3. Коптиков, В.П. , Бокий, Б.В. , Минеев, С.П. , Южанин, И.А. & Никифоров, А.В. (2016). *Совершенствование способов и средств безопасной разработки угольных пластов, склонных к газодинамическим явлениям*. Донецк: Проминь.
4. Зорин, А.Н., Халимендик, Ю.М. & Колесников, В.Г. (2001). *Механика разрушения горного массива и использование его энергии при добыче полезных ископаемых*. Москва: ООО «Недра-Бизнесцентр».
5. Перехов, И.М. & Линьков, А.М. (1978). *Механизм развязывания и протекания выбросов угля (породы) и газа. Основы теории внезапных выбросов угля, породы и газа*. Москва: Недра.
6. Соболев, В.В. (2003). К вопросу о природе образования выбросоопасных углей. *Сборник научных трудов НГУ*, 1(17), 505-511.
7. Булат, А.Ф., Скипочка, С.И., Паламарчук, Т.А. & Анциферов, В.А. (2010). *Метаногенерация в угольных пластах*. Днепропетровск: Лира ЛТД.
8. Малинникова, О.Н. (2011). *Условия формирования и методология прогнозирования газодинамических явлений при техногенном воздействии на угольные пласты*. Москва: УРАН ИПКОН РАН.
9. Скрицкий, В.А., Сурков, А.В. & Соболев, В.В. (2013). Причины зарождения и развития газодинамических явлений в угольных шахтах. *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*, (2), 102-108.
10. Минеев, С.П. (2018). О предупреждении аварий, связанных со взрывами метана в угольных шахтах. *Уголь Украины*, (1-2), 50-59.
11. Минеев, С.П. (2019). Вопросы ликвидации некоторых аварий, связанных со взрывами метановоздушных смесей и пожаров. *Физико-технические проблемы горного производства: Сборник научных праць*, (21), 9-21.
12. Минеев, С.П. (2017). Враг или друг шахтный метан? Это решают люди. *Охорона праці: Додаток до журналу*, (12), 49- 53.

13. Sobolev, V., Rudakov, D. & Stefanovych, L. (2017). Physical and mathematical modeling the conditions of coal and gas outbursts. *Mining of Mineral Deposits*, 11(3), 40-49.
14. Булат, А.Ф., Софийский, К.К., Бокий, В.В. и др. (2016). *Управление аэрологическими и геомеханическими процессами в угольных шахтах*. Мариуполь: Східний видавничий дім.
15. Булат, А.Ф. & Дырда, В.И. (2013). Некоторые проблемы газодинамических явлений в угольном массиве в контексте нелинейной неравновесной термодинамики. *Геотехническая механика*, (108), 3-31.
16. Ботвенко, Д.В., Казанцев, В.Г., Сазонов, М.С. & Высоцкий, В.В. (2014). Экспериментальные исследования пьезоэлектрического эффекта горных пород. *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*, 16-22.
17. Булат, А.Ф., Минеев, С.П., Смоланов, С.Н., Беликов, И.Б. & Самопаленко, П.М. (2018). Об особенностях управления метановыделением при ликвидации последствий взрывов метановоздушной смеси. *Уголь Украины*, (8), 29-34.
18. Подстригач, Я.С. & Повстенко, Ю.З. (1985). *Введение в механику поверхностных явлений в деформируемых твердых телах*. Киев: Наукова думка.
19. Боголюбов, И.Н., Ермилов, А.И. & Курбатов, А.М. (1988). *Введение в аналитический аппарат статистической механики*. Киев: Наукова думка.
20. Петров, Н. & Бранков, И. (1986). *Современные проблемы термодинамики*. Москва: Мир.
21. Глансдорф, П. & Пригожин, И. (1973). *Термодинамическая теория структуры, устойчивости в флуктуации*. Москва: Мир.
22. Булат, А.Ф., Макеев, С.Ю., Осенний, В.Я. Андреев, С.Ю., Емельяненко, В.И., Лойк, В.И. & Рыжов Г.А. (2007). Влияние различного рода воздействий на свойства и состояние газонасыщенного углепородного массива. *Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках*, Симферополь: Таврич. нац. ун-т., 52-56.
23. Минеев, С.П., Прусова, А.А. & Корнилов, М.Г. (2007). *Активация десорбции метана в угольных пластах*. Днепропетровск: Вебер.
24. Мирдель, Г. (1972). *Электрофизика*. Москва: Мир.
25. Желудев, И.С. (1987). *Физика кристаллов и симметрия*. Москва: Наука.
26. Булат, А.Ф., Макеев, С.Ю., Андреев, С.Ю. & Рыжов, Г.О. *Спосіб попередження газодинамічних явищ* Патент 88613 UA, МПК⁸ E21F 5/00, E21D 20/00.
27. Баранов, В.А. (2014). Микродеформации кварца карбоновых песчаников Донбасса. *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*, (12), 75-86.
28. Минеев, С.П. (2009). *Свойства газонасыщенного угля*. Днепропетровск: НГУ.
29. MacDonald A.D. (1966). *Microwave Breakdown in Gases*. New York - London - Sydney.
30. Dutton I. (1975). A survey of electron Swarm Data. *I. Rhys and Ehem. Ret.* 4(3).
31. Булат, А.Ф., Макеев, С.Ю., Андреев, С.Ю. & Рыжов Г.А. (2011). Феноменологическая модель генезиса динамических явлений в шахтах. *Підземні катастрофи: моделі, прогноз, запобігання*. Дніпропетровськ: НГУ, 11-16.
32. Булат, А.Ф. Скипочка, С.И. & Усаченко Б.М. (1998). Механоэлектрические эффекты пород угольных формаций и их роль в механизме газодинамических явлений. *Доповіді НАН України*. (1), 153-159.
33. Булат, А.Ф., Макеев, С.Ю., Андреев, С.Ю., Рыжов, Г.А. & Филимонов П.Е. (2011). Особенности процесса трещинообразования в массиве при управлении его газодинамикой. *Геотехническая механика*, (94), 24-30.
34. Бортников, П.Б., Кузьменко, А.П., Майнагашев, С.М. & Шмаков Ф.Д. (2011). *Способ определения размеров трещины в породах*. Пат. 2410727 RU, МПК⁷ E21C 39/00.
35. Минеев, С.П., Рубинский, А.А., Витушко, О.В., & Радченко, А.В. (2010). *Горные работы в сложных условиях на выбросоопасных угольных пластах*. Донецк: Східний видавничий дім.

36. Пилипенко, Ю.М. (2011). Дегазация угольных пластов в зонах тектонических нарушений. *Геолог Украины*, 2 (34), 69-73.
37. Ботвенко, Д.В. Казанцев, В.Г., Сазонов, М.С. & Высоцкий В.В. (2014). О возможности воспламенения метановоздушной смеси от пьезоэлектрического эффекта горных пород. *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*, (1), 96-98.
38. Скипочка, С.И. (2002). *Механоэлектрические эффекты в породах и их использование в горной геофизике*. Днепропетровск: НГАУ.
39. Волошин, Н.Е. Греков, С.П. & Пашковский, П.С. (2010). Механизм образования очагов самовозгорания угля в краевой части угольного пласта. *Уголь Украины*, (10), 28-30.
40. Минеев, С.П., Кочерга, С.П., Дубовик, А.И., Лосев, В.И. & Мишкань, М.А. (2016). Расследование аварии с двумя взрывами метановоздушной смеси. *Уголь Украины*, (9-10), 14-22.

АННОТАЦИЯ

Цель. Исследование и обоснование возможных причин возникновения возгораний метановоздушной смеси при проходке выработок и выемке угля в шахтах.

Методы исследования. Для обоснования причин зарождения и развития газодинамических явлений с последующим воспламенением метана в угольных шахтах выполнен анализ физических и математических моделей этого процесса. Рассмотрено термодинамическое состояние горного массива в тензорном виде для лагранжевых координат. Выполнена оценка прироста энтропии элемента горного массива не только за счет изменения его механических свойств, но и за счет протекания в нем термоэлектрических явлений.

Результаты. Обосновано, что скорость протекания в горном массиве процессов, связанных с изменением энтропии определяется не только его механическими свойствами, но так же зависит от термоэлектрических явлений. Получила дальнейшее развитие гипотеза воспламенения метановоздушной смеси за счет пьезоэлектрического эффекта обусловленного деформациями зерен кварца под действием внешнего давления. Показано, что берега трещин в разрушаемом материале представляют собой потенциальные полюса для проскальзывания между ними микроплазменных разрядов при пробое углеводородного газа. Выполнена оценка скорости роста трещин в единице объема массива и обоснована возможность управления этим процессом за счет снижения коэффициента, характеризующего накопление упругой энергии в области вершины трещины. Предложена физико-химическая обработка угольного пласта, которая увеличивает критическое значение коэффициента интенсивности напряжений, значительно повышая стойкость призабойной части массива.

Научная новизна. Установлена качественная зависимость удельной скорости роста концентрации трещин в единице объема от времени, которая показывает, что существует возможность снизить вероятность лавинообразного роста трещин путем уменьшения коэффициента, характеризующего накопление упругой энергии в области вершины трещины.

Практическая значимость. Предложены мероприятия, которые будут включены в рекомендации по предупреждению возгораний метановоздушной смеси при проходке горных выработок и выемке угля взрыво- и пожароопасного пласта.

Ключевые слова: метановоздушная смесь, газодинамические явления, микронарушенность, пьезоэлектрический эффект, образование трещин.

ABSTRACT

The purpose of the work is the study and justification of the possible causes of ignitions of methane-air mixture during the tunnelling of workings and the excavation of coal in the mines

Research methods. Analysis of the physical and mathematical models of the origin and development of gas-dynamic phenomena with the subsequent ignition of methane in coal mines was investigated for justify its reasons. The thermodynamic state of the massif in the form of the tensor considered for Lagrangian coordinates. Estimation of the entropy increase for the massif element was investigated not only by changing its mechanical properties, but at the expense of occurrence in it of thermoelectric phenomena.

The results. It is proved that the velocity of processes in the rock massif associated with the entropy change is determined not only by its mechanical properties, but also depends on the thermoelectric phenomena. The hypothesis of ignition of methane-air mixture due to the piezoelectric effect, caused by deformation of the quartz grains under the action of external pressure, was further developed. It is shown that the shores of the cracks in the destroyed material pose a potential pole slip between micro-plasma discharges in the breakdown of hydrocarbon gas. Estimation of growth rate of cracks per unit volume of the rock massif was investigated. The ability to control this process by reducing the coefficient characterizing the accumulation of elastic energy in region of crack tip, was grounded. The physicochemical treatment of the coal seam proposed, which increases the critical value of stress intensity factor, greatly increasing the durability of the bottom-hole massif.

Scientific novelty. The qualitative dependence of specific growth rate concentration of cracks per unit volume from time to time established. It shows that it is possible to reduce the likelihood of exponential growth of cracks by reducing the coefficient characterizing the accumulation of elastic energy in region of crack tip.

The practical significance. The activities, which to be included in recommendations for the prevention of ignitions of methane-air mixture during the tunneling working and dredging of coal explosion and fire formation, is proposed.

Keywords: *methane-air mixture, the gas-dynamic phenomena, microcracking, the piezoelectric effect, the formation of cracks.*