

А.Ф.Булат, О.П.Круковський, В.В.Круковська

**ДЕФОРМУВАННЯ ГАЗОНОСНИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД І ФІЛЬТРАЦІЯ ГАЗУ
ПРИ ПРОВЕДЕННІ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК**

*Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України,
вул. Сімферопольська, 2а, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: igtm@ukr.net*

Abstract. A numerical simulation is performed for the coupled processes of deformation of the coal-rock massif with a mine working and gas filtration in the disturbed area. A change in rocks permeability depending on their stress state is taken into account during the simulation. The cases are considered when the mine working is supported with frames or rock bolts. The zones of inelastic deformations, distributions of fields of stress, deformations, permeability coefficients and gas pressure were obtained. The graphs of changes in geomechanical and filtration parameters over time are shown. The results of calculation are analyzed. It is shown that the roof bolting can be used not only to preserve the stable state of mine workings, but also as a technological means of reducing gas emissions into the mine atmosphere.

Key words: coupled processes, rock deformation, rock permeability, gas filtration, mine working, roof bolting, numerical simulation.

Вступ.

Гірничі роботи у вугільних шахтах ініціюють процеси деформування порід та фільтрації метану, що міститься в тріщинно-поровому просторі вугілля та газоносних пісковиків. Підвищений приплив метану до гірничих виробок з вугільного пласта, що відпрацьовується, з джерел газовиділення, які розташовані в покрівлі і підшві виробки, – це результат спільного перебігу в часі двох процесів: перерозподілу поля напружень і фільтрації газу. У багатьох випадках метан, що виділяється в атмосферу гірничих виробок, перешкоджає ефективному вуглевидобутку і стає загрозою безпеці шахтарів [6, 9, 12, 17]. Тому дослідження зв'язаних процесів деформування газоносного масиву і фільтрації метану представляє науковий і практичний інтерес.

Було розроблено багато моделей фільтрації газу у вуглепородному масиві, що тим чи іншим чином ураховують вплив напруженого стану порід і вугілля при розрахунках кількості метану, виділеного з вугільного пласта, що відпрацьовується, тиску метану в пласті в межах виїмкового поля, концентрації метану у виробленому просторі [8, 16, 21, 23]. Ключем до опису фільтраційних процесів є побудова моделі проникності [21]. Існують різні моделі зв'язку коефіцієнту проникності від діючих напружень основані, в основному, на результатах експериментальних досліджень [4, 7, 11, 15, 18, 19].

На розподіл поля напружень, проникність масиву, а отже, і на процес фільтрації газу, впливають і технологічні фактори ведення гірничих робіт. Це схема відпрацювання вугільних пластів, наявність відпрацьованих раніше сусідніх виїмкових ділянок, технології проведення і кріплення виробки. Зокрема, мало уваги приділяється впливу кріплення гірничих виробок на перебіг фільтраційних процесів в порушеній зоні вуглепородного масиву. Тому метою роботи є дослідження зв'язаних процесів деформування газоносних гірських порід і фільтрації газу при проведенні гірничих виробок з підпірним (рамним) і анкерним кріпленням.

§1. Постановка задачі.

При моделюванні процесів деформування порід і фільтрації газу приймається гіпотеза суцільності, гірський масив вважається однорідним у межах кожного породного шару. Фільтраційний потік вважається ізотермічним, неперервним. Зміна в часі напружено-деформованого стану породного масиву, формування газопроникної області і процес фільтрації газу описується системою рівнянь [1, 10, 11, 14]:

$$c_g \frac{\partial u_i}{\partial t} = \sigma_{ij,j} + X_i(t) + P_i(t); \quad (1.1)$$

$$Q^* = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\gamma H}; \quad P^* = \frac{\sigma_3}{\gamma H};$$

$$k = \begin{cases} 0, & Q^* < 0,4; \quad P^* > 0,2; \\ k_{\min}, & 0,4 < Q^* < 0,6; \quad P^* > 0,1; \\ e^{0,26Q^* - 4,65}, & 0,6 < Q^* < 1,0; \quad P^* > 0,1; \\ k_{\max}, & Q^* > 1,0; \quad P^* < 0,1; \end{cases} \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k}{2\mu m} \left(\frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p^2}{\partial y^2} \right) + q(g_0, t),$$

де c_g – коефіцієнт демпфування; t – час; u_i – переміщення; $\sigma_{ij,j}$ – похідні від компонент тензора напружень по x, y ; $X_i(t)$ – проекції зовнішніх сил, що діють на одиницю об'єму твердого тіла; $P_i(t)$ – проекції сил, обумовлених тиском газу в тріщинно-поровому просторі; Q^* – геомеханічний параметр, що характеризує різнокомпонентність поля напружень; P^* – геомеханічний параметр, що характеризує розвантаження порід від гірського тиску; s_1, s_3 – максимальна і мінімальна компоненти тензора головних напружень; γ – усереднена вага розташованих вище гірських порід; H – глибина розробки; k – проникність, спричинена проведенням виробки; k_{\min} – мінімальне значення коефіцієнту проникності, достатнє для початку процесу фільтрації; k_{\max} – проникність в зоні руйнування; p – тиск газу; k – фільтраційна проникність породи; μ – в'язкість газу; m – пористість породи; q – функція виділення газу, що моделює десорбцію метану; g_0 – газонасність породи.

Як початкові та граничні умови для поставленої задачі задано:

$$\sigma_{yy}|_{t=0} = \gamma H; \quad \sigma_{xx}|_{t=0} = \lambda \gamma H; \quad p|_{t=0} = p_0;$$

$$u_x|_{\Omega_1} = 0; \quad u_y|_{\Omega_2} = 0; \quad p|_{\Omega_3} = p_{at}; \quad p|_{\Omega_4(t)} = p_0,$$

де Ω_1 – вертикальні межі зовнішнього контуру; Ω_2 – горизонтальні межі зовнішнього контуру; Ω_3 – контур виробки; $\Omega_4(t)$ – межі області фільтрації, що змінюються у часі; p_0 – пластовий тиск метану; p_{at} – атмосферний тиск.

Задача розв'язується в пружно-пластичній постановці. Для математичного опису переходу порід в порушений стан застосовується критерій Кулона-Мора. Наведена система рівнянь розв'язується за допомогою методу скінченних елементів [5, 20, 22].

В роботі розглядаються поперечні перерізи виробок, які закріплено рамним (рис. 1, *a*) та анкерним (рис. 1, *б*) кріпленням [2]. Сірим кольором на цих рисунках показано газоносні пласти: в боках виробки – вугілля, в покрівлі – пісковик; білим – аргіліт. Рамне кріплення моделюється наданням відповідних властивостей певним скінченним елементам на контурі виробки. Для моделювання анкера використовується стержневий скінченний елемент. Для даного одномірного елемента з ізотропного матеріалу всі геометричні і фізичні характеристики, а також компоненти напружено-деформованого стану, є функціями одного аргументу [13]. Зважаючи на те, що напруження в анкері можуть перевищувати межу пружності, його напружено-деформований стан розглядається в пружно-пластичній постановці.

Система «анкерне кріплення – породний масив» працює в режимі взаємовпливних деформацій. Такий режим взаємодії передбачає спільну роботу анкерного кріплення та приконтурного масиву. При цьому навантаження на анкер визначається деформацією в процесі його взаємодії з породою, що деформується. І навпаки, на величину зміщення приконтурного масиву впливає деформований анкер.

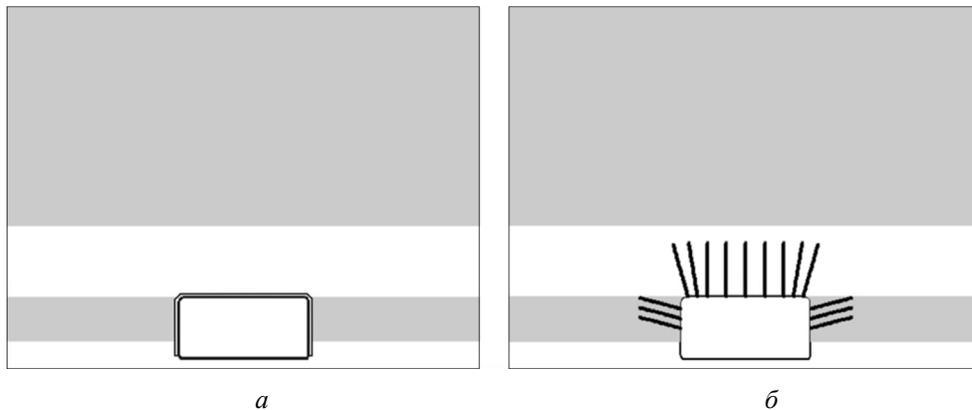


Рис. 1

Блок-схема алгоритму розрахунку параметрів зв'язаних процесів деформування вуглепородного масиву з гірничою виробкою і фільтрації метану в зоні її впливу приведена на рис. 2.

На кожній часовій ітерації розраховуються:

- поле переміщень u_i і напружень σ_{ij} , зони непружних деформацій в породі і кріпленні;
- поле коефіцієнтів проникності $k(\sigma_{ij})$;
- параметри фільтрації метану (тиск, швидкості фільтрації, витрати);
- сили, що обумовлені тиском газу.

В результаті проведення гірничих виробок, виїмки породи і вугілля приконтурний масив розвантажується від гірського тиску. Суцільність гірських порід порушується, навколо сформованої порожнини починає розвиватися процес тріщиноутворення. Тільки після набуття породами фільтраційної проникності і поширення області фільтрації до джерел метановиділення розпочинається фільтрація метану до гірничої виробки. Тому в першу чергу на кожній часовій ітерації розраховуються геомеханічні параметри.

При виконанні подальших розрахунків прийнято, що висота виробки – 2,6 м; ширина – 5,4 м; $H=1000$ м; $p_0=8 \cdot 10^6$ Па; $p_{at}=1 \cdot 10^5$ Па; $k_{\min}=1 \cdot 10^{-18}$ м²; $k_{\max}=5 \cdot 10^{-16}$ м²; потужність вугільного пласту – 1,9 м, його газонасність $g_0=22,5$ м³/т; потужність пісковика – 11 м, він розташований в покрівлі виробки на відстані 3,0 м від її поверхні, його газонасність $g_0=1,5$ м³/т; довжина анкера – 2,4 м. Ці дані, як і властивості гірських порід, і схема анкерного кріплення (рис. 1, *б*), відповідають гірничо-техніч-

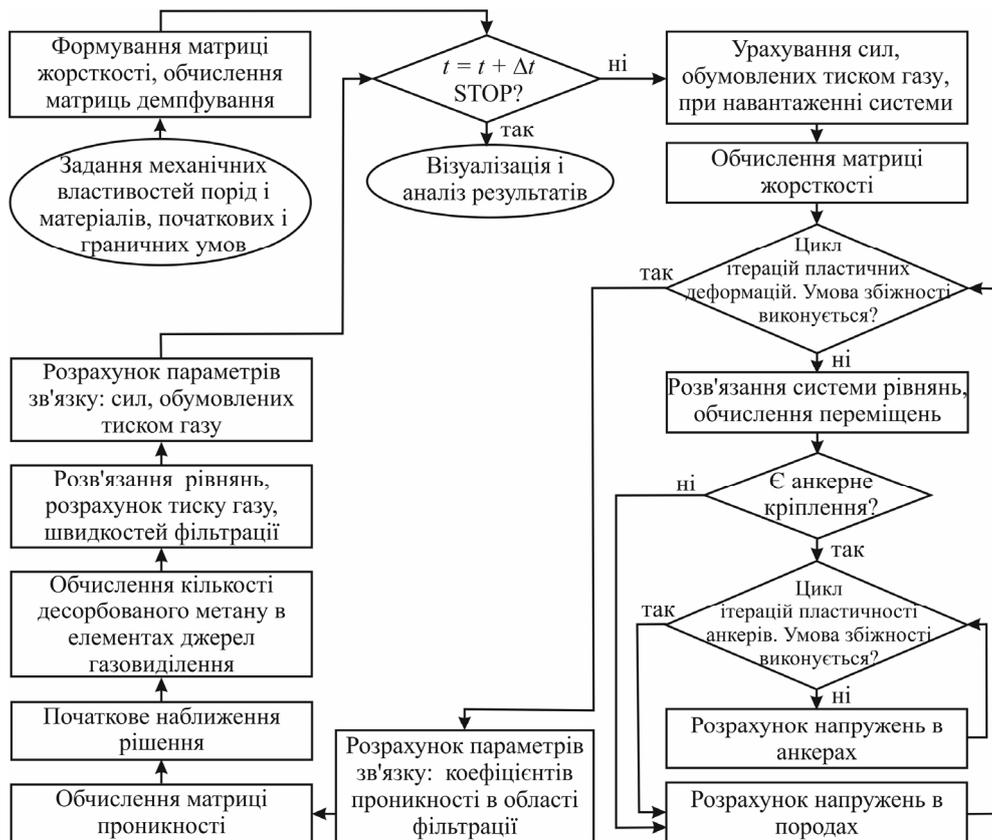


Рис. 2

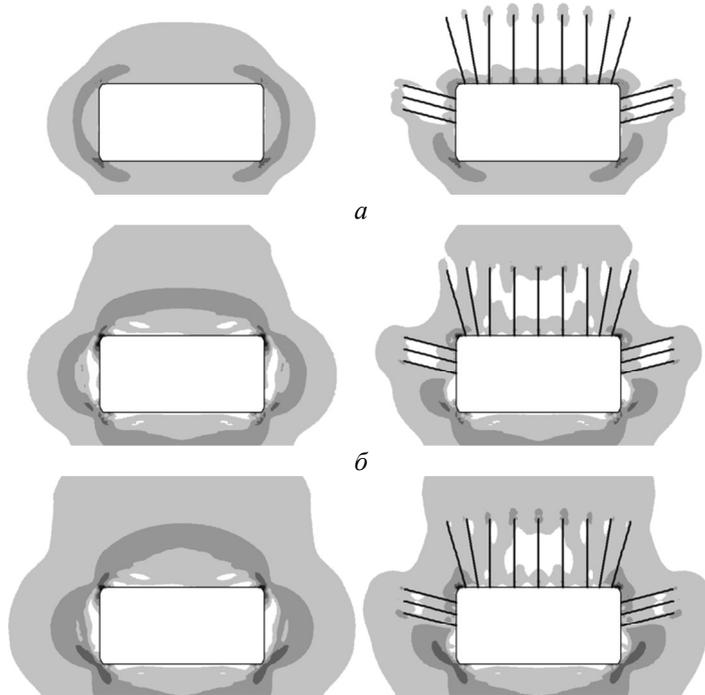
ним умовам проведення західного флангового вентиляційного ходка № 23 пласта і з шахти «Суходільська-Східна» ПАТ «Краснодонвугілля».

§2. Результати розрахунку напружено-деформованого стану породного масиву навколо виробки з рамним та анкерним кріпленням.

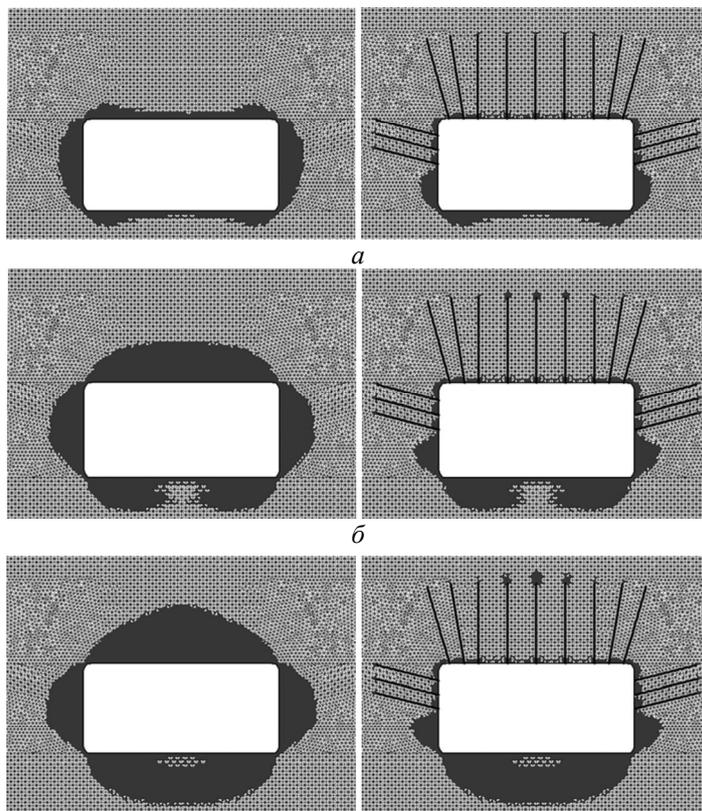
В результаті виконання розрахунків було отримано поля напружень, деформацій і зони непружних деформацій в досліджуваній області вуглепородного масиву в різні моменти часу. На рис. 3 наведено результати розрахунку параметру Q^* , що характеризує різнокомпонентність поля напружень.

Білий колір відповідає значенням параметру $Q^* < 0,4$; світло-сірий – $0,4 < Q^* < 0,8$; сірий – $0,8 < Q^* < 1,2$; темно-сірий – $1,2 < Q^* < 1,6$; чорний – $Q^* > 1,6$. На рис. 4 представлено зони непружних деформацій. Дані на рис. 3 і рис. 4 надано для моментів часу: а) $t = 1$ доба; б) $t = 3$ доби; в) $t = 15$ діб.

З часом, в міру видалення вибою, в гірських породах навколо виробки поширюється зона підвищеної різнокомпонентності поля напружень, де $Q^* > 0,4$ (рис. 3). Видно, що наявність у покрівлі більш міцного пісковика накладає відбиток на розподіл значень параметра Q^* (рис. 3, б і рис. 3, в). В безпосередній близькості від контуру виробки мінімальна компонента тензора головних напружень прямує до нуля, і поступово зростає зона непружних деформацій, глибина якої навколо виробки з підпирним кріпленням через 2 тижні зростає до 1,7 м в покрівлі і до 1 м в боках (рис. 4, в, ліворуч). Руйнування приконтурного масиву в цій зоні відбувається шляхом поділу його на окремі, слабо взаємодіючі блоки. В таких умовах максимальна компонента поля напружень значно знижується, що призводить до зменшення різнокомпонентності поля напружень в зоні непружних деформацій (рис. 3).



6
Puc. 3



6
Puc. 4



Рис. 5

Однак, в боках і покрівлі виробки з анкерним кріпленням (рис. 4, праворуч) зона непружних деформацій практично зникає. Також зникає тут і область підвищеної різнокомпонентності поля напружень, де $0,8 < Q^* < 1,2$. Замість неї в заанкерованій частині порід і вугілля присутні області, де $Q^* < 0,4$ (рис. 3, праворуч), і приконтурні породи збережено в стані, наближеному до всебічного стиснення. Отже, анкерне кріплення запобігає руйнуванню гірських порід і забезпечує стійкість виробки.

Про високий ступінь монолітності приконтурних порід можна судити по слідах виконавчого органу комбайна, які добре збереглися на поверхні аргіліту, в покрівлі і верхній частині боку західного флангового вентиляційного ходка № 23 шахти «Суходільська-Східна», рис. 5.

Графіки зміни у часі середніх значень $Q^*_{сер}$ і $P^*_{сер}$ в заанкерованих зонах покрівлі і боків виробки представлено на рис. 6. Пунктирною лінією на цих графіках позначено залежності для виробки з рамним кріпленням, суцільними – з анкерним. Лінії 1 відповідають значенням параметрів в покрівлі виробки, лінії 2 – в боках.

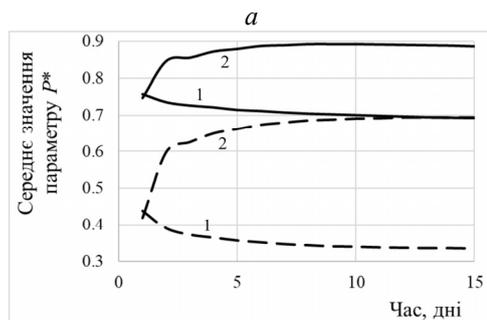
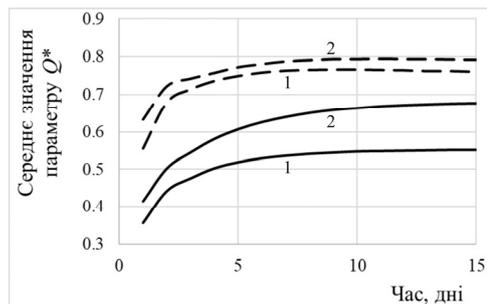


Рис. 6

Зростання значень параметра Q^* призводить до тріщиноутворення різного ступеня інтенсивності. Чим нижче значення цього геомеханічного параметра в приконтурних породах, тим вище стійкість гірничої виробки. Протягом перших 6 – 10 діб значення $Q^*_{сер}$ в породах навколо обох виробок підвищується (рис. 6, а), відбувається активний період зрушення приконтурних порід. Потім цей процес стабілізується, система «породний масив – кріплення» переходить в стійкий стан.

З рис. 6, а бачимо, що пунктирні лінії 1 і 2 для $Q^*_{сер}$ у виробці, закріпленій рамами, розташовані вище, ніж суцільні. Застосування анкерного кріплення знижує різнокомпонентність поля напружень на 15 – 35%, що значно покращує стійкість гірничої виробки.

При оголенні вільної поверхні під час проведення виробки знижується мінімальна компонента тензора головних напружень (параметр P^*). Чим вище значення

параметра P^* у певній області породного масиву, тим ближче стан цієї області до рівнокомпонентного стиснення, і тим менша ймовірність її руйнування. З рис. 6, б добре видно, що встановлення анкерів значно покращує стан приконтурних порід. В заанкерованих зонах боків виробки $P^*_{сер}$ на 22 – 44 %, а в покрівлі на 42 – 52 % вище, ніж в тих же зонах навколо виробки, яку закріплено рамами.

На рис. 7 зображено переміщення у часі центральної точки покрівлі виробок з рамним і анкерним кріпленням. Пунктирною лінією на графіку позначено залежність для виробки з рамним кріпленням, суцільними – з анкерним.

Бачимо, що переміщення покрівлі виробки з анкерами в 1,5 рази менші, ніж в виробці з підпірним кріпленням.

Таким чином, у заанкерованій області гірські породи знаходяться в умовах, близьких до тривісного стиснення, з підвищеними значеннями мінімальної компоненти тензора головних напружень. Отже, в покрівлі і боках виробки з анкерним кріпленням сформовано породно-анкерне склепіння, де породи збережені в природному, непорушеному стані, а анкери ефективно взаємодіють між собою, перешкоджаючи зміщенню приконтурного масиву всередину гірничої виробки та підвищуючи її стійкість.

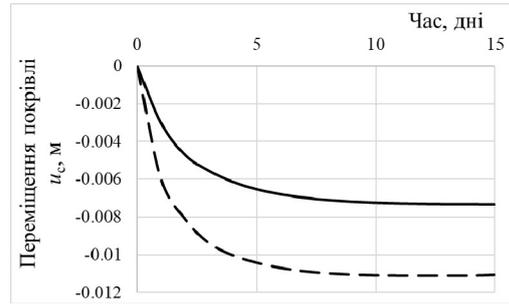


Рис. 7

§3. Проникність порід навколо виробки з рамним та анкерним кріпленням.

За формулами (1.2) на кожній часовій ітерації обчислювалось поле коефіцієнтів проникності вуглепородного масиву (рис. 8). Дані на рис. 8 надано для моментів часу а) $t=1$ доба; б) $t=3$ доби; в) $t=15$ діб. Значення проникності на рисунках збільшуються від k_{\min} до k_{\max} з переходом кольору від білого до чорного.

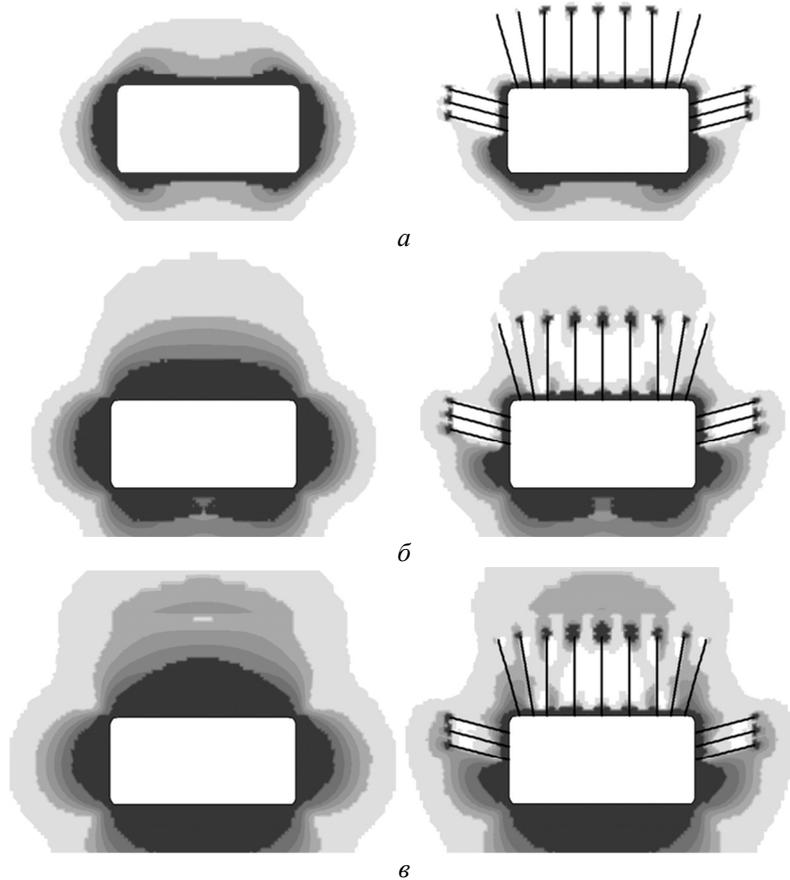


Рис. 8

В непорушеному масиві, поза зоною впливу гірничої виробки, породи, як правило, знаходяться в умовах тривісного стиснення. Різноконтентність поля напружень

тут близька до нуля ($0 < Q^* < 0,4$), газ міститься в ізольованих порах, фільтраційна здатність відсутня. При пружному деформуванні порід фільтраційні властивості середовища мало змінюються. Можна вважати, що ця зона також не належить до області фільтрації. Поза межами пружності і до межі міцності, при різнокомпонентному навантаженні, відбуваються процеси початку тріщиноутворення ($0,4 < Q^* < 0,6$), коли з'являється мінімальна проникність, і інтенсивного тріщиноутворення ($0,6 < Q^* < 1,0$), коли відбувається зростання коефіцієнтів проникності на 2-3 порядки в різних гірських породах. Подальше зростання коефіцієнтів проникності поза межею міцності відбувається лише за рахунок розширення існуючих тріщин. В області руйнування, яка задовольняє умові $P^* < 0,1$ і критерію Кулона-Мора, коефіцієнт проникності сягає максимальних значень [3, 21].

Можна бачити, що навколо виробки з рамним кріпленням (рис. 8, ліворуч) утворюється область фільтрації з коефіцієнтами проникності, відмінними від нуля. Всередині цієї області газ може переміщатися у напрямку від джерел його виділення в простір виробки.

Контури області фільтрації змінюються, якщо в покрівлі та боках виробки встановлені анкери (рис. 8, праворуч). У цьому випадку в покрівлі формується непроникна для метану зона. Фільтрація флюїдів із джерел, розташованих у покрівлі, до виробки через таку перемичку практично неможлива або значно утруднена. Проникність у боках виробки з анкерним кріпленням також помітно нижча порівняно з виробкою, яку закріплено рамами.

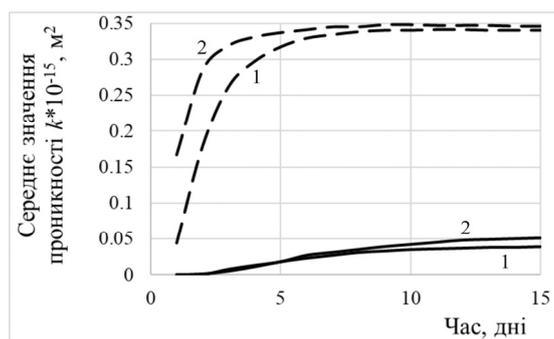


Рис. 9

На рис. 9 представлено середні значення проникності гірських порід в заанкерених зонах покрівлі і боків виробок з різними видами кріплення. Пунктирною лінією позначено залежності для виробки з рамним кріпленням, суцільними – з анкерним. Лінії 1 відповідають значенням параметрів в покрівлі виробки, лінії 2 – в боках.

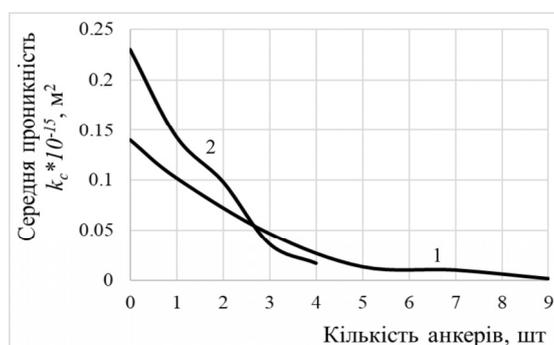


Рис. 10

Виконані розрахунки показують, що анкерне кріплення стримує розвиток процесу тріщиноутворення в зоні впливу виробки і дозволяє знизити проникність гірських порід в покрівлі виробки в 9 разів, в боках – в 7 разів на момент часу $t=2$ тижні. При цьому розміри області фільтрації значно скорочуються, проникність усередині неї знижується, що призводить до зменшення інтенсивності фільтраційного руху до повного попередження або зниження припливу метану до гірничої виробки з анкерним кріпленням.

В результаті виконання серії чисельних розрахунків досліджено вплив кількості анкерів, установлених в покрівлі і боках виробки, на проникність приконтурних порід і побудовано графіки зміни середнього значення коефіцієнтів проникності в заанкерованих областях (рис. 10).

З графіка, наведеного на рис. 10, випливає, що з кожним встановленим у покрівлі виробки анкером (при їх кількості менше 6) проникність порід покрівлі знижується на 12 – 27%. Однак подальше зростання числа анкерів не призводить до скільки-небудь значної зміни середньої проникності в заанкерованій області покрівлі. Кожен з анкерів, встановлених у боках виробки, зменшує значення коефіцієнтів проникності в заанкерованій області на 8 – 38%.

§4. Фільтрація газу до виробок з рамним та анкерним кріпленням.

За допомогою розробленої математичної моделі зв'язаних процесів зміни напруженого стану газоносного масиву і фільтрації метану, досліджено, як різні види кріп-

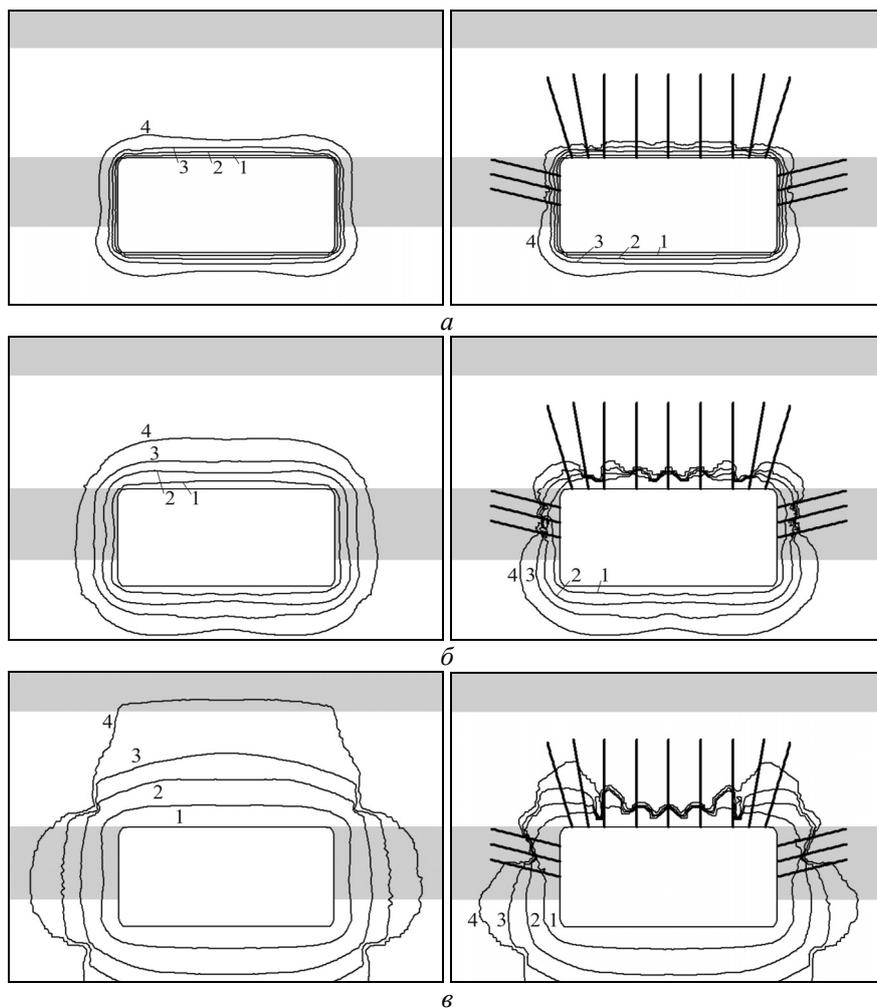


Рис. 11

лення впливають на зміну фільтраційних параметрів. На рис. 11 показано ізобари відносного тиску метану p/p_0 в порушених породах навколо виробок з рамним та анкерним кріпленням. Дані надано для моментів часу: а) $t=1$ доба; б) $t=3$ доби; в) $t=15$ діб. Світло-сірим кольором показано джерела виділення метану – вугільний пласт і пісковик. Лінії 1 відповідають тиску газу $p/p_0=0,2$; лінії 2 – $p/p_0=0,4$; лінії 3 – $p/p_0=0,6$; лінії 4 – $p/p_0=0,98$.

Завдяки анкерам також зменшується обсяг дегазованої частини вугільного пласта.

З часом тиск метану в прилеглих до виробки з рамним кріпленням частинах вугільного пласта, падає (рис. 11, ліворуч). Це свідчить, що пласт дегазується; метан переміщується з нього в шахтну атмосферу. Через 2 тижні область зниженого тиску метану захоплює нижню частину газоносного пісковика в покрівлі виробки (рис. 11, в, ліворуч), почався процес фільтрації метану і з цього джерела газовиділення. Отже, навколо виробки з підпірним кріпленням активно відбувається процес фільтрації метану.

На рис. 11, в праворуч видно, що в результаті утворення непроникної породно-анкерної зони область зниженого тиску не торкається газоносного пісковика покрівлі. Тобто метан з цього джерела газовиділення не потрапляє у виробку з анкерним кріпленням, що значно зменшить її загазованість.

На шахті Суходільська-Східна, де груповий вентиляційний ходок блоку № 1 проводився із застосуванням анкерного кріплення. Поблизу, в аналогічних гірничо-геологічних умовах, 12-ий східний конвеєрний штрек проводився з використанням рамного кріплення. За даними служби вентиляції шахти багатогазовість групового вентиляційного ходка протягом часу зведення і до підходу лави була значно меншою, ніж 12-го східного конвеєрного штреку.

Аналогічно на шахті Самсонівська-Західна ПАТ «Краснодонвугілля» в однакових гірничо-геологічних умовах по вугільному пласту k_2^H проводилися вентиляційний хідник 8-ої східної похилої лави, що кріпився анкерами, і 8-ий східний конвеєрний ухил, що кріпився рамами. У покрівлі пласта k_2^H розташовані вугільний прошарок потужністю 0,2 – 0,35 м та пісковик потужністю 32,6 – 38,9 м. Природна газоносність вугільних пластів – 20 – 25 м³/т; пісковика – 5 м³/т. За даними служби вентиляції шахти багатогазовість вентиляційного ходка, закріпленого анкерним кріпленням, значно менша, ніж 8-ого східного конвеєрного ухилу.

Висновок.

Таким чином, виконаний аналіз показує, що з часом, в міру видалення вибою, в гірських породах навколо виробки з підпірним кріпленням поширюється зона підвищеної різнокомпонентності поля напружень. В безпосередній близькості від контуру виробки мінімальна компонента тензора головних напружень прямує до нуля і поступово зростає зона непружних деформацій. Однак, в боках і покрівлі виробки з анкерним кріпленням зона непружних деформацій не розвивається. В заанкерованій області породи і вугілля збережено в стані, наближеному до усебічного стиснення.

Навколо виробки з рамним кріпленням утворюється область фільтрації з великою проникністю. Всередині цієї області газ може переміщатися у напрямку від джерел його виділення в простір виробки. У випадку використання анкерного кріплення в покрівлі формується практично непроникна для газу перемичка.

З часом тиск метану в прилеглих до виробки з рамним кріпленням частинах вугільного пласта падає; метан переміщується з нього в шахтну атмосферу. Через 2 тижні область зниженого тиску захоплює нижню частину газоносного пісковика в покрівлі виробки, починається процес фільтрації метану і з цього джерела газовиділення. В покрівлі і боках виробки з анкерним кріпленням сформовано непроникне породно-анкерне склепіння, в результаті метан із газоносного пісковика не потрапляє у виробку, що значно зменшить її загазованість.

Отже, анкерне кріплення запобігає руйнуванню гірських порід і забезпечує стійкість виробки. При цьому область фільтрації поширюється повільно, проникність усередині неї дуже мала, приплив метану до гірничої виробки з анкерним кріпленням значно знижується, що підтверджується шахтними спостереженнями.

Анкерне кріплення традиційно використовується тільки для забезпечення стійкості гірничих виробок і не розглядається як засіб впливу на протікання фільтраційних процесів. Проте, виконаний аналіз показує, що кріплення гірничої виробки може впливати на фільтрацію газу, що відбувається в зоні її впливу. Зокрема, анкерне кріплення може бути використане не тільки для збереження стійкого стану гірничих виробок, а і як технологічний засіб зниження виділення метану в шахтну атмосферу.

РЕЗЮМЕ. Виконано чисельне моделювання зв'язаних процесів деформування вуглепородного масиву з гірничою виробкою і фільтрації газу в порушеній області. При моделюванні враховано зміну проникності порід в залежності від їх напруженого стану. Розглянуто випадки, коли виробку закріплено рамним або анкерним кріпленням. Визначено зони непружних деформацій, розподіли полів напружень, деформацій, коефіцієнтів проникності, тиску газу. Представлено графіки зміни геомеханічних і фільтраційних параметрів в часі. Проаналізовано отримані результати. Показано, що анкерне кріплення може бути використане не тільки для збереження стійкого стану гірничих виробок, а і як технологічний засіб зниження виділення метану в шахтну атмосферу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: деформування вуглепородного масиву, кріплення гірничої виробки, фільтрація газу, чисельне моделювання.

1. *Басниев К.С, Кочина И.Н., Максимов В.М.* Подземная гидромеханика. – Москва: Недра, 1993. – 416 с.
2. *Булат А.Ф., Виноградов В.В.* Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 2002. – 372 с.
3. *Виноградов В.В.* Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок. – Киев: Наук. думка, 1989. – 192 с.
4. *Bai M., Meng F., Elsworth D., Zaman M., Roegiers J.-C.* Numerical modeling of stress-dependent permeability // *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sci.* – 1997. – **34**, N 3 – 4. – P. 2.e1 – 2.e14.
5. *Chen Z.* Finite Element Methods and Their Applications. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. – 410 p.
6. *Copur H., Cinar M., Okten G., Bilgin N.* A case study on the methane explosion in the excavation chamber of an EPB-TBM and lessons learnt including some recent accidents // *Tunnelling and Underground Space Technology.* – 2012. – N 27. – P. 159 – 167.
7. *Durucan S., Daltaban T.S., Shi J.Q., Foley L.* Permeability characterization for modeling methane flow in coal seams // *Proc. of the Int. Coalbed Methane Symposium.* – Tuscaloosa, Alabama, 1993. – P. 453 – 460.
8. *Guo H., Adhikary D.P., Craig M.S.* Simulation of mine water inflow and gas emission during longwall mining // *Rock Mechanics and Rock Engng.* – 2009. – N 42. – P. 25 – 51.
9. *Jiang B., Lin B., Shi S., Zhu C., Zhai C.* Numerical Analysis on Propagation Characteristics and Safety Distance of Gas Explosion // *Procedia Engineering.* – 2011. – N 26. – P. 271 – 280.
10. *Krukovska V.V., Kocherga V.M.* Influence of the method of gate road protection on the operating efficiency of methane drainage boreholes // *Essays of Mining Science and Practice: III Int. Conf. – Dnipro, Ukraine, October 06 – 08, 2021.* – IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2022. – N 970. – 012045.
11. *Krukovska V.V., Krukovskiy O.P., Kocherga V.M., Kostrytsia A.O.* Solving coupled problems of geomechanics and gas filtration for mining safety ensuring // *Geo-Technical Mechanics.* – 2022. – N 160. – P. 106 – 122.
12. *Krukovskiy O., Krukovska V.* Numerical simulation of the stress state of the layered gas-bearing rocks in the bottom of mine working // *Essays of Mining Science and Practice: I Int. Conf. – Dnipro, Ukraine, June 25 – 27, 2019.* – E3S Web of Conferences, 2019. – N 109. – 00043.
13. *Krukovskiy O., Krukovska V., Skipochka S.* Interaction of rock-bolt supports while weak rock reinforcing by means of injection rock bolts // *Mining of Mineral Deposits.* – 2021. – **15**, N 4. – P. 8 – 14.

14. *Krukovskiy O., Krukovska V., Zhang W.* Outburst cavity formation in the working face driven along the outburst-prone coal seam // *Essays of Mining Science and Practice: II Int. Conf.* – Dnipro, Ukraine, April 22 – 24, 2020. – E3S Web of Conferences, 2020. – N 168. – 00052.
15. *Ma D., Miao X.X., Chen Z.Q., Mao X.B.* Experimental Investigation of Seepage Properties of Fractured Rocks Under Different Confining Pressures // *Rock Mechanics and Rock Engineering.* – 2013. – N 46. – P. 1135 – 1144.
16. *Szlazak J., Szlajak N.* Numerical determination of methane concentration in goaf space. // *Archives of Mining Sciences.* – 2004. – N 49. – P. 587 – 599.
17. *Wang C., Yang S., Li X.* Simulation of the hazard arising from the coupling of gas explosions and spontaneously combustible coal due to the gas drainage of a gob // *Process Safety and Environmental Protection.* – 2018. – N 118. – P. 296 – 306.
18. *Yang T.H., Tang C.A., Zhu W.C., Feng Q.Y.* Coupling analysis of seepage and stress in rock failure process 12 // *Chin. J. Rock. Soil. Eng.* – 2001. – N 23. – P. 489 – 493.
19. *Zhang J.C., Bai M., Roegiers J.C., Wang J.X., Liu T.Q.* Experimental determination of stress-permeability relationship // *Pacific Rock 2000: The 4th North American Rock Mechanics Symposium.* – Rotterdam: Balkema, 2000. – P. 817 – 822.
20. *Zhao C., Valliappan S.* Finite element modelling of methane gas migration in coal seams // *Computers and Struct.* – 1995. – N 55. – P. 625 – 629.
21. *Zhou H.W., Zhao J.W., Su T., Zhang L., Zhong J.C., Liu Z.L.* Characterization of gas flow in backfill mining-induced coal seam using a fractional derivative-based permeability model // *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sci.* – 2021. – N 138. – 104571.
22. *Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z.* *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals.* – Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2013. – 756 p.
23. *Zou S., Yu C., Xian X.* Dynamic nature of coal permeability ahead of a longwall face // *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sci.* – 1999. – N 36. – P. 693 – 699.

Надійшла 11.04.2023

Затверджена до друку 12.12.2023