



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 146370

(13) U

(51) МПК

E21F 1/02 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
"УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки:	u 2020 04527	(72) Винахідник(и):	Булат Анатолій Федорович (UA), Круковська Вікторія Вікторівна (UA), Круковський Олександр Петрович (UA), Хворостян Віктор Олексійович (UA)
(22) Дата подання заявки:	20.07.2020	(73) Володілець (володільці):	ІНСТИТУТ ГЕОТЕХНІЧНОЇ МЕХАНІКИ ІМ. М.С. ПОЛЯКОВА НАН УКРАЇНИ, вул. Сімферопольська, 2-а, м. Дніпро, 49005 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності:	18.02.2021		
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію:	17.02.2021, Бюл.№ 7		

(54) СПОСІБ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ВУГІЛЬНОГО ПЛАСТА ТА ПРОЦЕСУ ФІЛЬТРАЦІЇ ГАЗУ У ВИБОЇ ГІРНИЧОЇ ВИРОБКИ ПОБЛИЗУ ТЕКТОНІЧНОГО ПОРУШЕННЯ

(57) Реферат:

Спосіб дослідження напруженого стану вугільного пласта та процесу фільтрації газу у вибої гірничої виробки поблизу тектонічного порушення включає створення скінченно-елементної моделі пружно-пластичного, шаруватого породного масиву, однорідного у межах кожного породного шару, з гірничою виробкою, задання в скінченних елементах фізико-механічних властивостей, що визначаються шляхом випробувань зразків порід за допомогою преса, жорстке закріплення моделі на контурі, задання у кожному елементі скінченно-елементної моделі початкових напружень, відповідних глибині залягання порід. Задають параметри тектонічного порушення (координати площини змішувача, амплітуду зміщення, довжину порушеної зони). Розраховують скінченні елементи, що належать вугільному пласту, і задають в них фізико-механічні властивості вугілля, початковий тиск газу та функцію залежності кількості десорбованого газу від часу. Виконують розрахунок скінченних елементів, що потрапляють в порушену зону, розраховують в цих елементах знижені значення міцності вугілля на розтяг σ_p , зчеплення C і проникності вугілля. Проводять чисельний розрахунок моделі зв'язаних процесів деформування порід, фільтрації та десорбції газу у нестационарній постановці, на кожній часовій ітерації в кожному скінченному елементі моделі породного масиву розраховують величину напружень, зону непружних деформацій, значення фільтраційної проникності, в залежності від співвідношення компонент тензора головних напружень. Визначають область фільтрації, де проникність більша за нуль, в кожному скінченному елементі розраховують значення тиску газу, в залежності від проникності. Розраховують геометрію порожнини викиду за критеріями належності скінченних елементів зоні непружних деформацій, спричинених напруженнями розтягу, і перевищення градієнтом фільтрації метану критичного значення. На наступній часовій ітерації ураховують зміну тиску газу у елементах моделі породного масиву при розрахунку поля напружень.

UA 146370 U

UA 146370 U

Корисна модель належить до механіки гірських порід, а саме моделювання процесів фільтрації газу у вугільному пласті і зміни його напруженого стану з урахуванням взаємного впливу зазначених процесів.

Відомий спосіб геомеханічного аналізу масиву гірських порід методом скінченних елементів. Він дозволяє з високою точністю визначати розподіл напружень, напрямків і величину деформацій в елементах моделі та особливості руйнування при дії граничних навантажень [1],

Але при проведенні гірничої виробки по вугільних пластах, що містять газ (метан), зміна поля напружень навколо неї призводить до розповсюдження зони підвищеної тріщинуватості. Породини, що потрапили в таку зону, набувають фільтраційної проникності, починається процес фільтрації метану з вугільного пласта до виробки. При цьому початковий тиск метану у вугіллі падає, що впливає на його напружений стан [2]. Тож процеси деформування і фільтрації метану у вугільному пласті тісно пов'язані один з одним. Крім цього, їх розвиток залежить від фізико-механічних властивостей вугілля. Досить часто при проведенні виробок перетинаються тектонічні порушення, які оточені перем'ятим, порушеним вугіллям, фізико-механічні властивості якого значно відрізняються від властивостей в непорушеній зоні. Тому трапляється, що в таких зонах процеси деформування і фільтрації метану набувають динамічного характеру, відбуваються викиди вугілля і метану [3, 4], які загрожують безпеці ведення гірничих робіт. Для вивчення факторів розв'язування небезпечних динамічних явищ необхідне дослідження напруженого стану та процесу фільтрації газу у вибої гірничої виробки поблизу тектонічних порушень.

Найбільш близьким аналогом корисної моделі є спосіб дослідження стану газоносного гірського масиву та процесу фільтрації метану навколо гірничої виробки [5], що включає створення скінченно-елементної моделі пружно-пластичного, шаруватого породного масиву з гірничою виробкою, задання в скінченних елементах фізико-механічних властивостей, граничних та початкових умов, проведення чисельного розрахунку моделі зв'язаних процесів деформування порід, фільтрації та десорбції метану в нестационарній постановці, в результаті чого на кожній часовій ітерації в кожному елементі скінченно-елементної моделі визначаються параметри напруженого стану, фільтраційної проникності та параметри процесу фільтрації газу.

Але необхідно відзначити, що у найближчому аналогічному способі не враховується наявність поблизу виробки тектонічного порушення, яке оточено порушеним вугіллям із зміненими фізико-механічними властивостями. Для моделювання порушеної зони вугільного пласта необхідно:

задання параметрів тектонічного порушення (координати площини зміщування, амплітуда зміщення, довжина порушеної зони);

розрахунок скінченних елементів, по яких проходить порушена зона;

задання в скінченних елементах порушеної зони знижених значень міцності вугілля на розтяг σ_p і його зчеплення C , які визначаються експериментально;

розрахунок значень проникності вугілля, яка збільшується в напрямку площини зміщування, за лінійною залежністю;

визначення геометрії порожнини викиду за критеріями належності скінченних елементів зоні непружних деформацій, спричинених напруженнями розтягу, і перевищення градієнтом фільтрації метану критичного значення $|\text{grad}p| > P_c$.

В основу корисної моделі поставлено задачу удосконалити спосіб дослідження напруженого стану вугільного пласта та процесу фільтрації газу у вибої гірничої виробки поблизу тектонічного порушення шляхом задання параметрів зони тектонічного порушення і знижених значень міцнісних властивостей вугілля в цій зоні, що надає можливість дослідити фактори розв'язування динамічних процесів та поліпшити безпеку ведення гірничих робіт.

Поставлена задача вирішується за рахунок того, що в способі дослідження напруженого стану вугільного пласта та процесу фільтрації газу у вибої гірничої виробки поблизу тектонічного порушення, який включає створення скінченно-елементної моделі пружно-пластичного, шаруватого породного масиву, однорідного у межах кожного породного шару, з гірничою виробкою, задання в скінченних елементах фізико-механічних властивостей, що визначаються шляхом випробувань зразків порід за допомогою преса, жорстке закріплення моделі на контурі, задання у кожному елементі скінченно-елементної моделі початкових напружень, відповідних глибини залягання порід, згідно з корисною моделлю, задають параметри тектонічного порушення (координати площини зміщувача, амплітуду зміщення, довжину порушеної зони), розраховують скінченні елементи, що належать вугільному пласту, і задають в них фізико-механічні властивості вугілля, початковий тиск газу та функцію залежності кількості десорбованого газу від часу, виконують розрахунок скінченних елементів, що потрапляють в порушену зону, розраховують в цих елементах знижені значення міцності вугілля

на розтяг σ_r , зчеплення C і проникності вугілля, проводять чисельний розрахунок моделі зв'язаних процесів деформування порід, фільтрації та десорбції газу у нестационарній постановці, на кожній часовій ітерації в кожному скінченному елементі моделі породного масиву розраховують величину напружень, зону непружних деформацій, значення фільтраційної
 5 проникності в залежності від співвідношення компонент тензора головних напружень, визначають область фільтрації, де проникність більша за нуль, в кожному скінченному елементі розраховують значення тиску газу в залежності від проникності, розраховують геометрію порожнини викиду за критеріями належності скінченних елементів зоні непружних деформацій, спричинених напруженнями розтягу, і перевищення градієнтом фільтрації метану критичного
 10 значення, та на наступній часовій ітерації ураховують зміну тиску газу в елементах моделі породного масиву при розрахунку поля напружень.

Урахування наявності тектонічного порушення і зміни фізико-механічних властивостей вугілля в порушеній зоні надає можливість досліджувати протікання зв'язаних геомеханічних і фільтраційних процесів, що відбуваються при проведенні гірничих виробок по
 15 викладонебезпечним вугільним пластам; досліджувати механізми розв'язування динамічних процесів, таких як викиди вугілля та газу, з метою їх запобігання.

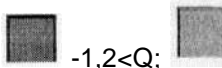
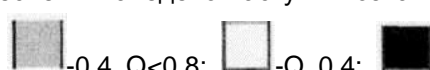
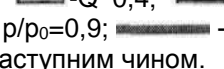

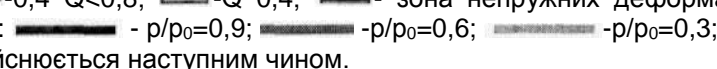
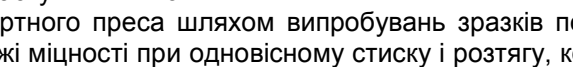
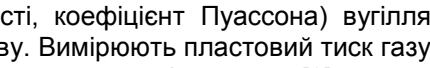
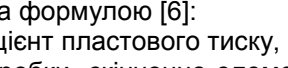
Суть корисної моделі пояснюється кресленням, де на Фіг. 1 зображено приклад центрального фрагмента скінченно-елементної моделі 1 вуглепородного масиву з гірничою
 20 виробкою 2 (повздовжній переріз), що проводиться по вугільному пласту 4 поблизу тектонічного порушення з площиною зміщувача 5. Амплітуда зміщення дорівнює S , довжина порушеної зони - L . Відстань між вибоєм 3 виробки 2 та площиною зміщувача 5 дорівнює L_1 .

На Фіг. 2 наведено результат розрахунку напружень (а саме - зони непружних деформацій і значення параметра $Q=(\sigma_1-\sigma_3)/\gamma H$, де σ_1 - максимальна компонента тензора головних напружень, σ_3 - мінімальна компонента тензора головних напружень, γ - усереднена вага гірських порід, які
 25 розташовані вище, H - глибина ведення гірничих робіт) для скінченно-елементної моделі 1 за умови $L < L_1$, тобто вибій виробки знаходиться поза межами порушеної зони, для моменту часу $t=10$ с.

На Фіг. 3 наведено результат розрахунку відносного тиску газу p/p_0 у вуглепородному масиві для скінченно-елементної моделі Фіг. 1 за умови $L < L_1$, коли вибій виробки знаходиться поза
 30 межами порушеної зони, для моменту часу $t=10$ с.

На Фіг. 4 наведено результат розрахунку зони непружних деформацій і значення параметра Q для скінченно-елементної моделі 1 за умови $L > L_1$, тобто вибій виробки знаходиться в порушеній зоні, для моменту часу $t=10$ с.

На Фіг. 5 наведено результат розрахунку відносного тиску газу p/p_0 у вуглепородному масиві та порожнини довжиною L_n , що утворюється в результаті викиду вугілля та газу, для скінченно-
 35 елементної моделі Фіг. 1 за умови $L > L_1$, коли вибій виробки знаходиться поза межами порушеної зони, для моменту часу $t=10$ с.

На кресленні наведено наступні позначення: значення параметра Q :  -1,2 < Q;  -0,4 < Q < 1,2;  -Q 0,4;  - зона непружних деформацій; ізобари відносного
 40 тиску газу p/p_0 :  - $p/p_0=0,9$;  - $p/p_0=0,6$;  - $p/p_0=0,3$;  - $p/p_0=0,1$.

Спосіб здійснюється наступним чином.

За допомогою стандартного преса шляхом випробувань зразків порід визначають фізико-механічні властивості (межі міцності при одновісному стиску і розтягу, коефіцієнт зчеплення, кут
 45 внутрішнього тертя, модуль пружності, коефіцієнт Пуассона) вугілля і порід, що складають досліджувану область гірського масиву. Вимірюють пластовий тиск газу в газоносних шарах або за відсутності фактичних вимірів розраховують за формулою [6]:

$$p_0 = \beta \cdot \gamma_{\text{води}} \cdot H, \text{ де } \gamma_{\text{води}} - \text{густина води; } \beta - \text{коефіцієнт пластового тиску, } \beta=0,85.$$

За допомогою програмних комплексів розробки скінченно-елементних сіток, наприклад Femap або Ansys, створюють комп'ютерну модель 1 гірського масиву з порожниною 2, що
 50 моделює простір гірничої виробки в повздовжньому перерізі. Приклад скінченно-елементної сітки показаний на Фіг. 1. Виконується оптимізація сітки скінченних елементів для розрахункової моделі.

Отриману скінченно-елементну модель експортують в програмне середовище, що реалізує метод скінченних елементів.

55 Задають умови закріплення моделі, які блокують вертикальні переміщення елементів сітки на горизонтальних границях моделі та горизонтальні переміщення елементів на вертикальних границях. Навантаження здійснюють шляхом задання початкових напружень, які дорівнюють

величині гірського тиску γH . Кожному скінченному елементу, що моделює певну гірську породу, надаються відповідні властивості, які визначено за допомогою випробувань на пресі.

Далі задають параметри тектонічного порушення (координати площини зміщувача, амплітуду зміщення, довжину порушеної зони). Розраховують скінченні елементи, що належать вугільному пласту, і задають в них фізико-механічні властивості вугілля, початковий тиск газу p_0 та функцію залежності кількості десорбованого газу від часу $q(t)$, наприклад:

$$q(t) = q_0 e^{-at} \text{ у вугіллі,}$$

де q_0 - початкове газовиділення, л/с; a - коефіцієнт, що ураховує властивості газовіддачі; t - час, що пройшов з моменту початку газовиділення, с

У вузлах на контурі виробки задають тиск газу, який дорівнює атмосферному (0,1 МПа).

У елементах сітки задають початкову проникність k_0 , причому в непрониких породах k_0 дорівнює 0.

Виконують розрахунок скінченних елементів вугільного пласта, що потрапляють в порушену зону, розраховують і задають в цих елементах знижені значення зчеплення C , проникності k_{Π} і міцності вугілля на розтяг σ_p за співвідношеннями:

$$C = C_0 - \frac{(C_0 - C_{\min})(x_{\Pi} - x)}{L};$$

$$k_{\Pi} = \frac{k_0(x_{\Pi} + L - x)}{L};$$

$$\sigma_p \approx 0; \text{ для } x \in [x_{\Pi}; x_{\Pi} + L],$$

де C_0 - зчеплення в непорушеній зоні, МПа; C_{\min} - мінімальне значення зчеплення в порушеній зоні, МПа; x_{Π} - координата x площини зміщувача, м; x - координата x вузла сітки, для якого виконується розрахунок, м; k_0 - проникність вугілля в непорушеній зоні, Да; σ_p - міцність вугілля на розтяг, МПа.

Проводять чисельний розрахунок моделі зв'язаних процесів зміни напруженого стану та фільтрації і десорбції метану в нестационарній постановці:

$$c_g \frac{\partial u}{\partial t} = \sigma_{ij,j} + X_i(t) + P_i(t)$$

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

де c_g - коефіцієнт демпфування, кг/с/м³; u_i - переміщення, м; $\sigma_{ij,j}$ - похідні від компонент тензора напружень по x, y , МПа/м; $X_i(t)$ - проекції зовнішніх сил, що діють на одиницю об'єму твердого тіла, Н/м³; $P_i(t)$ - проекції сил, зумовлених тиском газу в тріщинно-поровому просторі, Н/м³; p - тиск газу, МПа; K - абсолютна проникність породного масиву; m - пористість; μ - в'язкість газу.

На кожній часовій ітерації визначають розподіл напружень σ_{ij} у досліджуваній області гірського масиву, а також зони непружних деформацій, що свідчать про початок процесу тріщинотворення та руйнування масиву гірського масиву. Потім визначають значення абсолютної проникності $K = k_{\Pi} + k$ породного масиву. Значення K розраховують за співвідношеннями [2]:

$$k = \begin{cases} k_{\min} & \text{при } Q < 0,8; \\ e^{0,26Q - 4,65} & \text{при } Q > 0,8; P^* > 0,1; \\ k_{\max} & \text{при } Q > 0,8; P^* < 0,1 \end{cases}$$

де k_{\min} - мінімальне значення коефіцієнта проникності, необхідне для початку процесу фільтрації газу, м²; k_{\max} - максимальна проникність в порушеній зоні, м².

Далі визначають область фільтрації за критерієм: $K > 0$, визначають величину тиску метану в області фільтрації. Розраховують довжину L_{Π} порожнини викиду за критеріями належності скінченних елементів зоні непружних деформацій, спричинених напруженнями розтягу, і перевищення градієнтом фільтрації метану критичного значення.

На наступній часовій ітерації ураховують зміну тиску газу в елементах моделі породного масиву при розрахунку поля напружень.

В результаті розв'язання задачі отримують розподіли геомеханічних і фільтраційних параметрів, параметри порожнини викиду вугілля і метану, якщо він відбувається, в різні моменти часу.

На Фіг. 2 показано результат розрахунку поля напружень та зони непружних деформацій для скінченно-елементної моделі 1 у випадку, коли виробка 2 знаходиться поза межами порушеної зони, для розрахункового моменту часу $t=10$ с. В непорушеній зоні вугільного пласта 4 геомеханічні і фільтраційні процеси розвиваються поступово, зона непружних деформацій дуже мала, область, де $Q>0,8$, збільшується повільно. Так само повільно знижується тиск метану у вугільному пласті 4 поблизу вибою 3 виробки 2, Фіг. 3, утворення порожнини викиду не відбувається. Всі процеси носять квазістаціонарний характер, динамічних явищ не спостерігається.

На Фіг. 4 наведено результат розрахунку зони непружних деформацій і значення параметра Q для скінченно-елементної моделі 1 за умови $L>L_1$, тобто вибій 3 виробки 2 знаходиться в порушеній зоні, для моменту часу $t=10$ с. Поблизу тектонічного порушення, в порушеній зоні вугільного пласта, спостерігається зовсім інша картина протікання зв'язаних процесів зміни напруженого стану вуглепородного масиву і фільтрації метану, Фіг. 4, 5. Область підвищеної різнокомпонентності поля напружень, де $Q>0,8$, стрімко просувається вглиб масиву. Зона непружних деформацій, що в даному випадку збігається з порожниною руйнування, швидко зростає від вибою виробки по вугільному пласту, Фіг. 4. Тиск метану у вугільному пласті поблизу виробки швидко падає, градієнти тиску і швидкість фільтрації метану приймають дуже високі значення, проникність вугілля стрімко зростає - відбувається винос вугілля і утворення порожнини у вугільному пласті, довжина якої L_P сягає 6,75 м, Фіг. 5, при даних початкових і граничних умовах.

Таким чином створюється чисельна модель для дослідження напруженого стану вугільного пласта та процесу фільтрації газу, умов розв'язування та перебігу газодинамічних процесів у вибої гірничої виробки поблизу тектонічного порушення. Перевагами запропонованого способу є урахування впливу напружено-деформованого стану породного масиву на його фільтраційну проникність, одночасне дослідження трьох зв'язаних процесів - деформування порід, фільтрації та десорбції метану, урахування наявності тектонічного порушення, що надає можливість дослідити фактори розв'язування динамічних процесів та поліпшити безпеку ведення гірничих робіт.

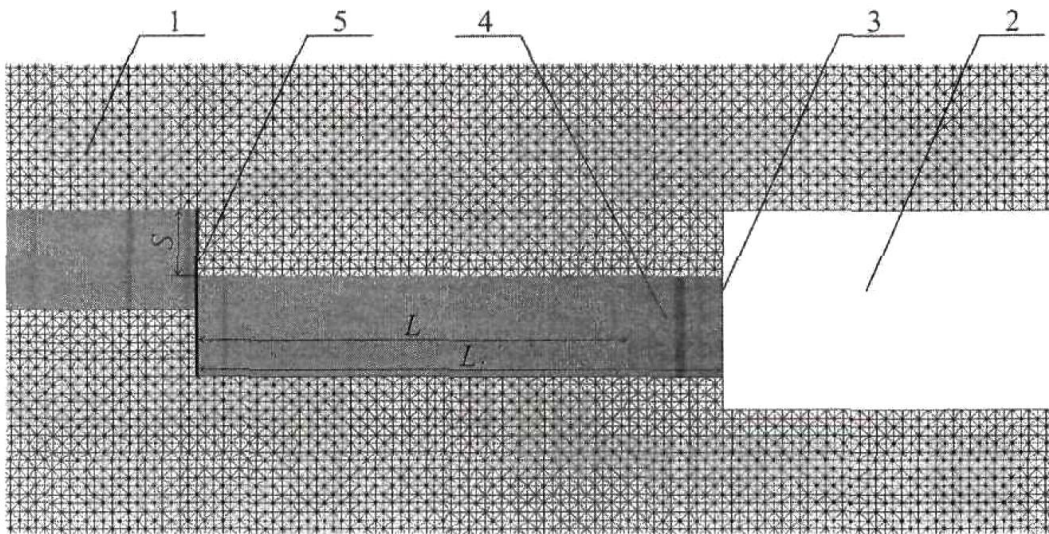
Джерела інформації:

1. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. - М.: Недра, 1987.- 224 с.
2. Круковская В.В. Моделирование связанных процессов, происходящих в углепородном массиве при ведении горных работ //Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. /ИГТМ НАН Украины. - Днепропетровск, 2015. - № 121. -С. 48-99.
3. Каталог внезапных выбросов угля и газа на шахтах /ВНИИ Горн, геомеханики и маркшейд. дела, Укр. фил. - Л: ВНИИМ, 1989. - 195 с.
4. Формирование выбросоопасных зон в углепородном массиве и способы предотвращения выбросоопасности на шахтах /А.И. Жаров, Н.Н. Красюк, А.В. Ремезов [и др.]. - Кемерово: Кузбассвуиздат, 2006. - 92 с.
5. Спосіб дослідження стану газоносного гірського масиву та процесу фільтрації метану навколо гірничої виробки. Патент на корисну модель по заявці у 2017 09 204 МПК E21F 1/02; заявник і власник патенту ІГТМ НАН України. - № 124361; 10.04.2018. - Бюл. № 7/2018.
6. Проблемы поверхностной дегазации на угольных месторождениях /В.В. Лукинов, О.С. Торопчин, Д.П. Гуля и др. //Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. /ИГТМ НАН Украины. - Днепропетровск, 2005. - № 53. - С. 138-142.

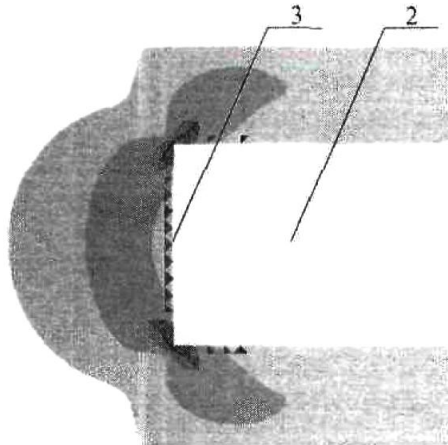
ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Спосіб дослідження напруженого стану вугільного пласта та процесу фільтрації газу у вибої гірничої виробки поблизу тектонічного порушення, який включає створення скінченно-елементної моделі пружно-пластичного, шаруватого породного масиву, однорідного у межах кожного породного шару, з гірничою виробкою, задання в скінченних елементах фізико-механічних властивостей, що визначаються шляхом випробувань зразків порід за допомогою преса, жорстке закріплення моделі на контурі, задання у кожному елементі скінченно-елементної моделі початкових напружень, відповідних глибині залягання порід, який **відрізняється** тим, що задають параметри тектонічного порушення (координати площини змішувача, амплітуду зміщення, довжину порушеної зони), розраховують скінченні елементи, що належать вугільному пласту, і задають в них фізико-механічні властивості вугілля,

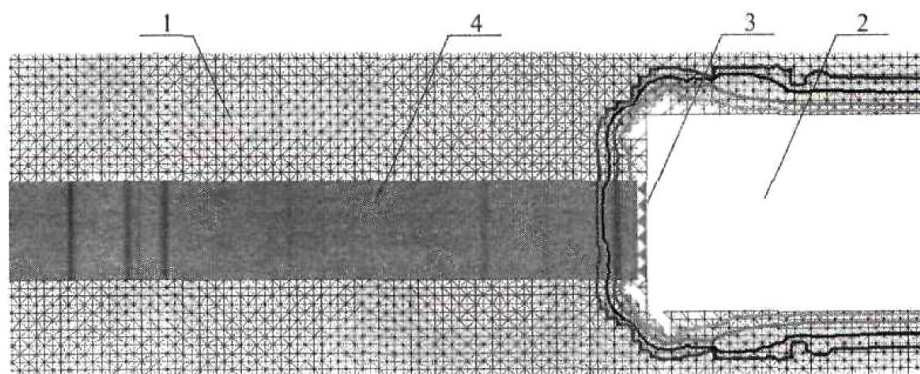
початковий тиск газу та функцію залежності кількості десорбованого газу від часу, виконують розрахунок скінченних елементів, що потрапляють в порушену зону, розраховують в цих елементах знижені значення міцності вугілля на розтяг σ^p , зчеплення C і проникності вугілля, проводять чисельний розрахунок моделі зв'язаних процесів деформування порід, фільтрації та десорбції газу у нестационарній постановці, на кожній часовій ітерації в кожному скінченному елементі моделі породного масиву розраховують величину напружень, зону непружних деформацій, значення фільтраційної проникності, в залежності від співвідношення компонент тензора головних напружень, визначають область фільтрації, де проникність більша за нуль, в кожному скінченному елементі розраховують значення тиску газу, в залежності від проникності, розраховують геометрію порожнини викиду за критеріями належності скінченних елементів зоні непружних деформацій, спричинених напруженнями розтягу, і перевищення градієнтом фільтрації метану критичного значення, та на наступній часовій ітерації ураховують зміну тиску газу у елементах моделі породного масиву при розрахунку поля напружень.



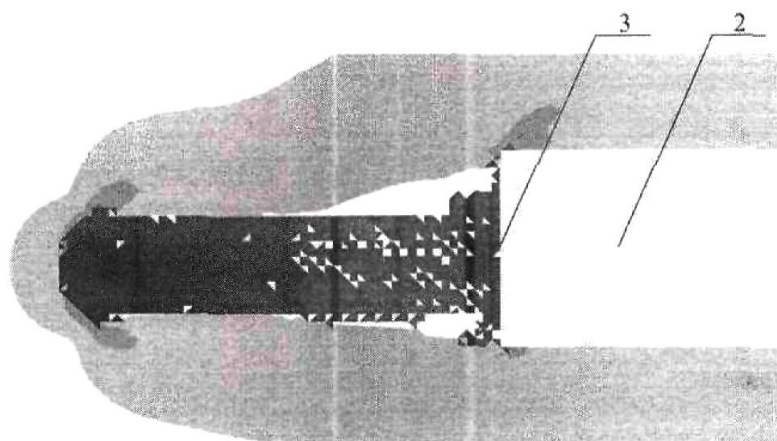
Фіг. 1



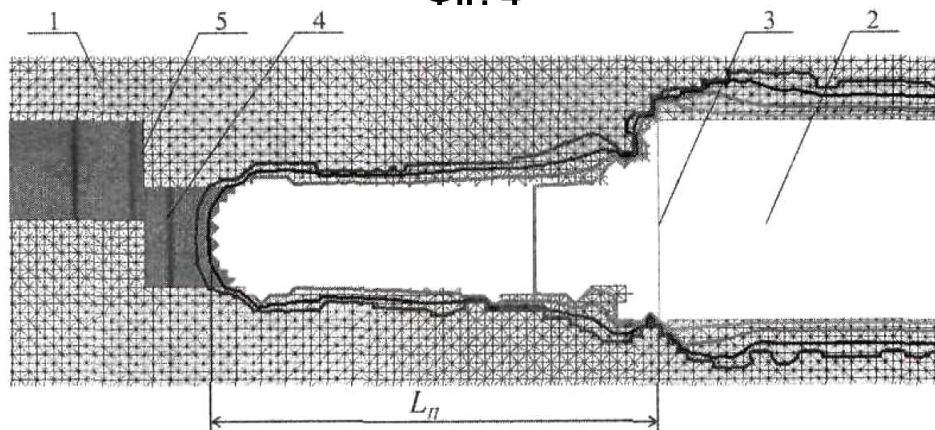
Фіг. 2



Фіг. 3



Фіг. 4



Фіг. 5