

УДК 622.831

В.В. Назимко, Л.М. Захарова, О.В. Чеснокова

## ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНОЇ ДИНАМІКИ ГАЗОВИДІЛЕННЯ НАВКОЛО ГІРНИЧОЇ ВИРОБКИ

V. Nazymko, L. Zakharova, O. Chesnokova

### NONSTATIONARY DYNAMICS OF THE GAS FILTRATION AROUND AN UNDERGROUND OPENING

**Мета.** Метою даного дослідження було вивчення впливу швидкості посування гірничого вибою на розподіл тиску метану. Це має велике значення з міркувань безпеки. Треба запобігти небезпечним динамічним подіям коли газ, вугілля та пісковики можуть спричинити раптові викиди та викликати сильне руйнування й спустошення в підземному просторі. Для цього теоретичні та чисельні комп'ютерні моделі досліджували нестационарну динаміку фільтрації метану в підземних виробках.

**Методика.** В теоретичній моделі використано диференціальне рівняння фільтраційного процесу та закони еластичного перерозподілу напружень під час зрушень та деформації масиву гірських порід. Розв'язана спряжена задача розвитку руйнування масиву під дією механічних напружень та гідравлічного тиску газу. Теоретичне рішення порівняно з числовим на базі платформи FLAC3D.

**Результати.** Попереду рухомого вибою виникає розподіл газового тиску, графік якого є випуклою лінією. Завдяки збільшенню швидкості руху збільшується кривизна цієї лінії. З часом ця кривизна згасає і перед гірничим вибоєм з'являється такий розподіл тиску газу, що описується увігнутою лінією. Момент переходу розподілу від опуклої до увігнутої форми кривої є критичним для визначення оптимального періоду видобування газу.

**Наукова новизна.** Розроблена модель дегазації товщі навколо підземної виробки, вибій якої рухається з різною швидкістю. Вперше був виявлений перехід від опуклих до увігнутих форм кривої, яка описує закон зміни газового тиску після критичного періоду що минув після зупинки гірничого вибою.

**Практичне значення.** Результат дослідження був використаний як практична рекомендація щодо видобутку метану з вугільних пластів. Практична реалізація дослідження має економічне значення, тому що оптимальний момент для закриття виснаженої свердловини забезпечує мінімізацію фінансових витрат на комерційне освоєння вугільно-метанових родовищ. Крім того, в цілях безпеки було визначено мінімальну глибину обробки масиву порід, яка насичується збитковою кількістю метану.

**Ключові слова:** вугільний метан, підземна виробка, вугільний вибій, швидкість посування, розподіл газового тиску.

**Вступ.** Видобувні галузі України здатні забезпечити енергетичну й сировинну незалежність держави. Проте розробка корисних копалин супроводжується низкою фізичних процесів, які впливають на безпеку підземних робіт. Найбільш небезпечними є вибухи метано-повітряних сумішей, раптові викиди вугілля і газу й пожежі у вугільних шахтах. Незважаючи на значний прогрес, досягнутий у вивченні цих комплексних небезпечних явищ, низка проблем залишається недостатньо вивченою. Зокрема це стосується фізичних процесів нестационарного газовиділення вибухонебезпечного метану з масиву гірських по-

рід під час підземної розробки вугільних родовищ, які дають майже все кам'яне вугілля нашої держави.

**Формулювання цілей статті.** Проблема полягає у тому, що для підтримання конкурентоздатності видобувних підприємств в умовах ринкової економіки необхідно підвищувати інтенсивність вуглевидобутку. Проте процеси десорбції метану й його фільтрації у робочий простір підземних виробок суттєво стримують темпи гірничих робіт. Закономірності взаємозв'язку темпів гірничих робіт з інтенсивністю газовиділення складні й неоднозначні. Зі зростанням темпів посування вибоїв питома кількість метану, що виділяється безпосередньо у вибої на тонну видобутку зменшується, а більша його частка виділяється зі супутників у вироблений простір. Це створює деякі можливості підвищення навантаження на очисні вибої за умов прямоочних схем провітрювання. Проте, під час підготовки запасів до виїмки така можливість не існує, оскільки увесь метан виділяється у робочий простір підготовчої виробки. Окрім того, підвищення швидкості посування вибоїв прямо сприяє зростанню ймовірності вкрай небезпечних газодинамічних явищ типу раптових викидів вугілля й газу, або пісковиків й метану. Тому збільшення інтенсивності підготовки запасів обмежується фізичними процесами десорбції й фільтрації вибухонебезпечного метану. Зауважимо, що зазвичай підготовка виїмкових стовпів до відпрацювання хронічно відстає від плану і це є однією з найпоширеніших проблем підземного вуглевидобутку.

Тому метою даної статті є дослідження закономірностей газовиділення у підземну підготовчу виробку за умов різної швидкості посування її вибоєю. Для цього були вирішені дві задачі нестационарної фільтрації метану у порожнину підземної виробки: на основі теоретичної й комп'ютерної моделей.

**Виклад основного матеріалу.** В роботі [1] було досліджено зміну тиску метану в крайовій частині газонасиченого вугільного пласта при стаціонарному посуванні вибоєю, що дозволило отримати закономірності зміни цього тиску від фізико-хімічних і геотехнологічних параметрів відпрацювання. Була отримана наступна залежність пластового тиску газу, виміряного в одиницях - пластового тиску в незайманому шарі, на відстані  $x$  – координаті, відлічуваної від вибоєю всередину пласта по його простяганню ( $0 < x < l$ ) в функції координати і часу:

$$p(x,t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{t D_f y^2}{x^2}\right) \sin y \, dy}{y} \quad (1)$$

де  $D_f$  - коефіцієнт фільтрації газу, що характеризує проникність вугілля при фільтрації метану.

Початкова умова до цього рівняння полягає в тому, що у початковий момент ( $t=0$ ) тиск газу всюди однаковий і дорівнює  $P_0$ , тобто пластовому тиску в незайманому пласті

$$p(x,0) = 1. \quad (2)$$

Граничні умови – це рівність нулю тиску на поверхні вибою, і прямування тиску до  $P_0$  при великих  $x$ :

$$p(0,t) = 0; p(\infty,t) = 1. \quad (3)$$

Введення безрозмірного параметра  $b \equiv \frac{D_f}{lv}$  і безрозмірного часу  $\tau \equiv vt/l$ , який зв'язує  $v$  - швидкість посування вибою і дійсний час  $t$ , дозволили отримати залежність від часу пластового тиску газу

$$p(x,t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{b \tau y^2}{(1-\tau)^2}\right) \sin y \, dy}{y}. \quad (4)$$

На рис.1 представлені результати чисельного рішення рівняння (3) з початковою умовою (1) і граничними умовами (2).

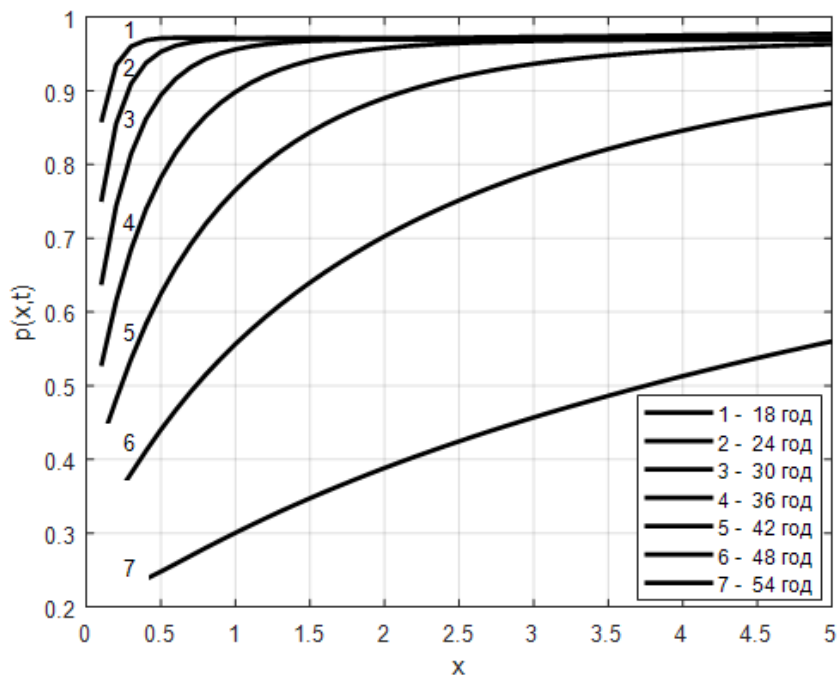


Рис.1. Зміна тиску метану в крайовій частині газонасиченого вугільного пласта при стаціонарному посуванні вибою

Для перевірки достовірності отриманих результатів і їх уточнення та ж сама задача вирішувалась за допомогою числової моделі FLAC3D, у формі спряженої задачі перерозподілу механічних напружень у газонасиченому масиву гірських порід і фільтрацію метану [2]. Відмітимо, що теоретичне рішення задачі про фільтрацію метану виконувалось в абстрактній площини, яка імітувала підготовчий вибій. Проте у реальності газовиділення відбувається у порожнину гірничої виробки, яка має певну форму і обмежений об'єм.

На рис. 2 наведено розрахункову схему у вигляді блоку, умовно вирізаному з масиву гірських порід. Моделювання виконувалось для умов пологого залягання порід. Для економії часу рішення розглядалась права симетрична половина виробки з оточуючим масивом. Підготовча виробка мала аркову форму перерізу шириною 5м і висотою 3,6м. Центр системи координат розміщений у середині вибою підготовчої виробки на відстані 1,3м від підшови виробки. Для дотримання граничних умов нижня грань розрахункової схеми розташовувалась на відстані 23м від центра координат у підґрунті виробки, а верхня – на відстані 34м у покрівлі вугільного пласта. Бокові стінки розрахункової схеми віддалені на 30м від центру системи координат. Такі розміри розрахункової схеми гарантують відсутність впливу граничних умов на перерозподіл механічних напружень і газового тиску навколо виробки.

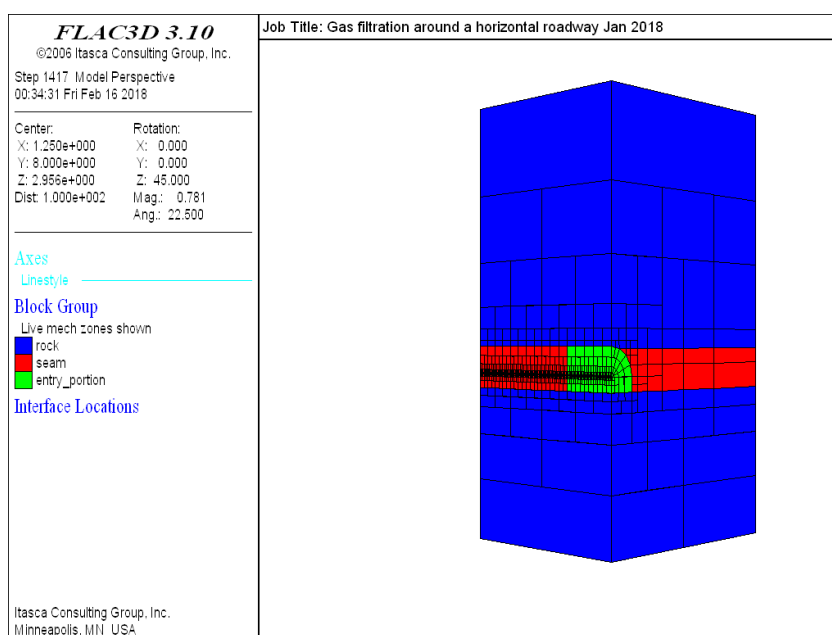


Рис. 2. Розрахункова схема

Розрахункова схема була розбита на 4796 зон, які перетинались у 6926 грид-точках. Це дало можливість детально дослідити особливості динаміки перерозподілу як механічних напружень у масиві гірських порід, так і газового тиску навколо підготовчої виробки. Виробка проходила по вугільному пласту потужністю 1,8м. Глибина розташування виробки становила 825м.

Механічні властивості порід покрівлі і підшови виробки були такими: об'ємний модуль деформації  $8 \cdot 10^9$  Па, модуль зсуву  $4 \cdot 10^9$  Па, зчеплення  $13.1 \cdot 10^6$  Па, кут внутрішнього тертя  $30^\circ$ , межа міцності на розтягнення порід  $9 \cdot 10^6$  Па, кут дилатансії порід у процесі їх руйнування  $5^\circ$ . Зчеплення вугілля було меншим і становило  $8.2 \cdot 10^6$  Па, межа міцності на розтягнення  $6.7 \cdot 10^6$  Па, кут дилатансії  $7^\circ$ . Процес переходу порід за межу міцності контролювався на основі закону Кулона-Мора, який є найбільш прийнятний для гірських вуглевміщуючих порід.

Механічні граничні умови приймалися такими: на бокових гранях моделі заборонялись переміщення по нормалі до площин вказаних граней. Нижня границя схеми закріплювалась повністю, а до верхньої прикладалось нормальне вертикальне напруження, яке обумовлене глибиною закладки підземної виробки. У якості гідравлічних початкових умов приймався тиск газу у недоторканому масиві на рівні 3МПа, а в робочому просторі підземної виробки – 0,1МПа, що відповідало атмосферному тиску.

Механічні напруження, які обумовлені гірським тиском, обчислювались системою диференційних рівнянь, що описували рух масиву гірських порід згідно другого закону Ньютона й теорії неасоційованого закону пластичності, оскільки враховувалось розпушення порід під час їх руйнування. Фільтрація метану у робочий простір підземної виробки моделювалась законом Дарсі у диференційній формі, який встановлював пропорційний зв'язок між швидкістю зміни газового тиску й темпами зміни об'єму газу у процесі його фільтрації, стискування механічними та термічними деформаціями масиву. Поруватість порід становила 1%. Проникність порід приймалась на рівні  $2 \cdot 10^{-13} \text{м}^2$ , вугілля –  $4 \cdot 10^{-13} \text{м}^2$ .

Процес проходки виробки починався з грані розрахункової схеми ZX, а виробка заглиблювалась у об'єм розрахункової області у напрямку осі Y. На рис. 3 видно як породи, що прилягали до контуру виробки, переходили у поза межний стан, втрачаючи свою міцність. Руйнування порід на контурі виробки відбувалось під комбінованим впливом розтягуючих та дотичних напружень. Відбувався також віджим прохідницького вибою у порожнину виробки. Саме під дією цих поза межних деформацій об'єм оточуючих порід збільшувався за рахунок розпушення, що пропорційно підвищувало їх проникність. Метан фільтрувався у порожнину виробки під дією градієнту газового тиску, який розповсюджувався по всьому породному оголенню виробки у процесі її проведення.

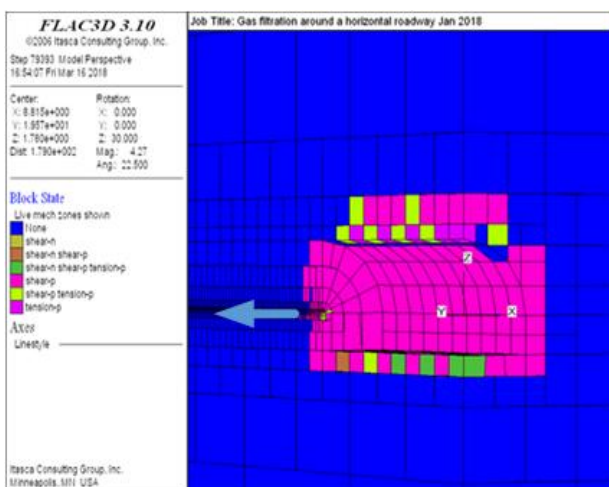


Рис. 3. Стан масиву навколо вибою підготовчої виробки

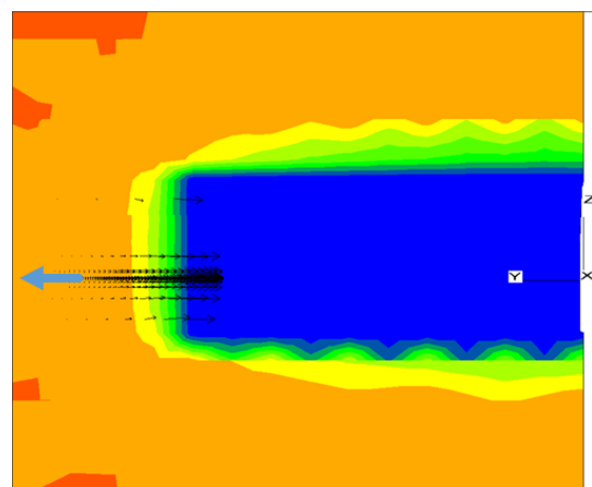


Рис. 4. Розподіл тиску у вертикальному перерізі виробки уздовж її осі

На рис. 4 показано розподіл газового тиску навколо виробки у вертикальному перерізі, що проведений уздовж осі виробки або осі Y. Напрямок проходки вказано стрілкою. Видно, як по мірі віддалення прохідницького вибою зона газового виснаження навколо виробки розширюється, що є наслідком фільтрації газу у її порожнину.

Підкреслимо, що диференціальні рівняння зв'язку як механічних напружень і деформацій, так і газового тиску і його витоку у явному вигляді враховували час. Тому числова модель безпосередньо враховувала як темпи проходки виробки, так і швидкість газовиділення, що залежала від градієнту газового тиску й проникності масиву. Темні стрілки показують вектори газових потоків, які найбільш інтенсивні з боку прохідницького вибою, причому максимальні потоки газу спостерігаються у середній частині вибою. Потоки газу з бокових стінок виробки та її підшви набагато менші, що відображає графік на рис. 5. Графік показує як у часі змінювалась швидкість газовиділення з однієї грид-точки (обмеженої елементарної ділянки вибою виробки). Видно, що початкова інтенсивність газовиділення ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) у кілька разів перевищує ту, що встановлюється через деякий час. Саме цим пояснюється переважний потік газу з площини прохідницького вибою, який сформований у найближчий час.

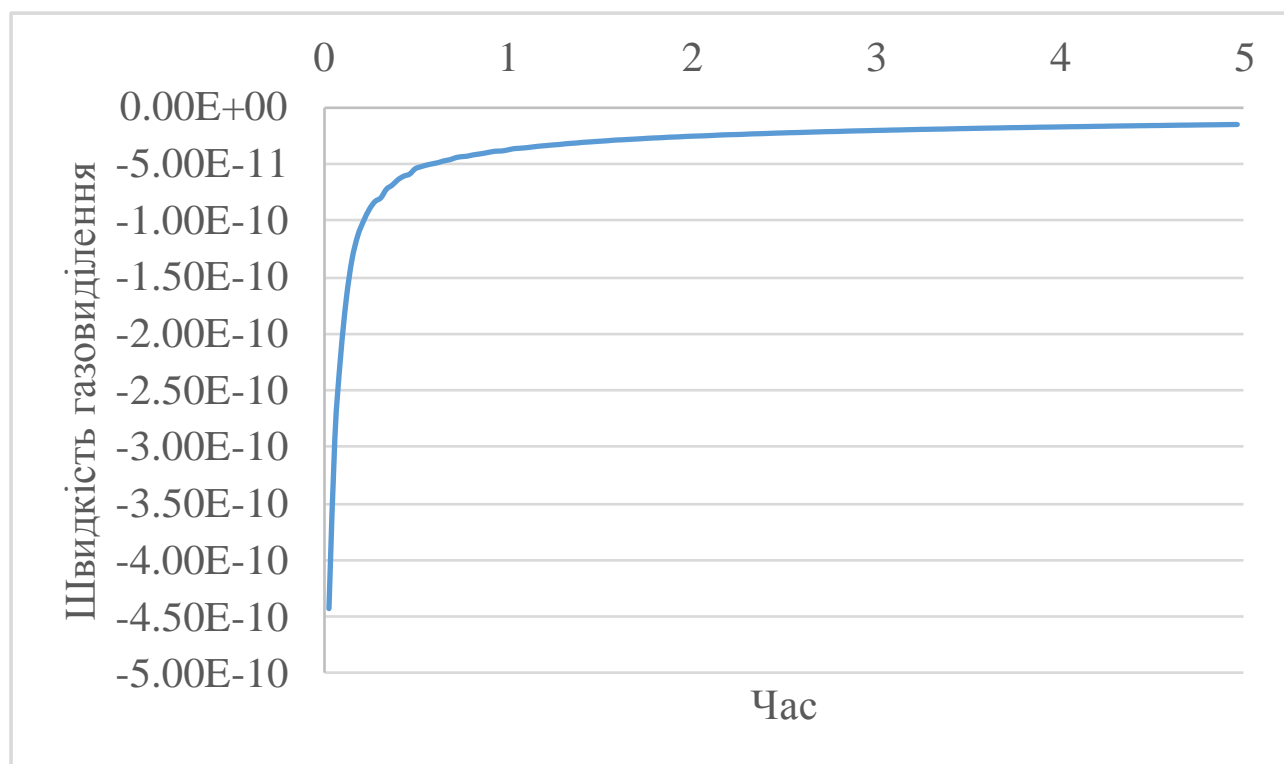


Рис. 5. Кінетика газовиділення з певної точки породного оголення прохідницького вибою

На рис. 6 показана еволюція зони газового виснаження навколо виробки у площині ZX ( $Y=0$ ), або на відстані 10м позаду прохідницького вибою.

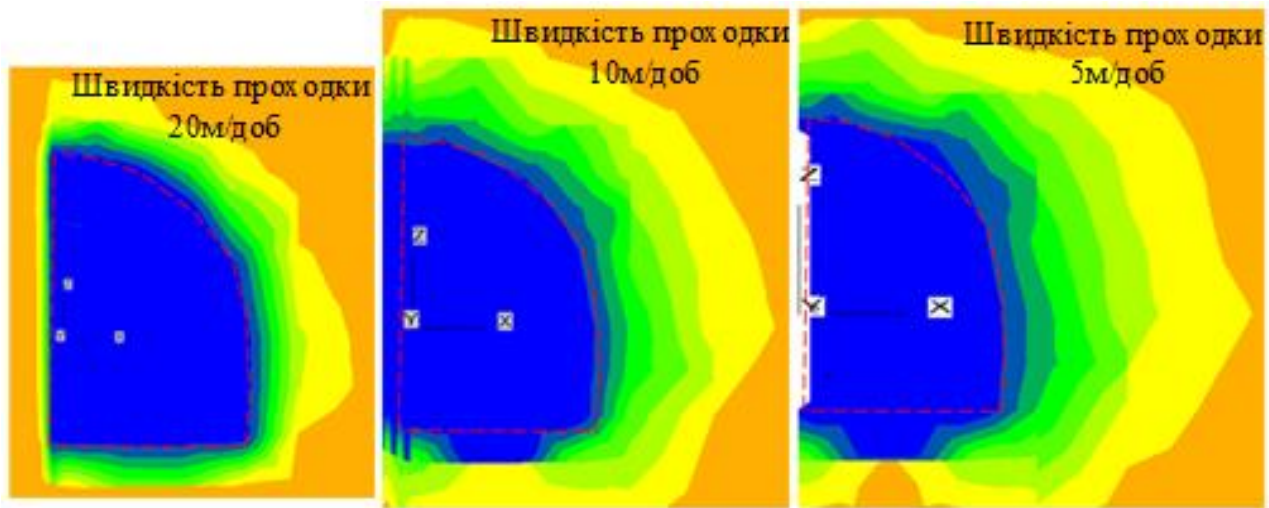


Рис. 6. Розподіл газового тиску навколо виробки за умов швидкості проходки

Зауважимо, що за таких швидкостей прохідницькому вибою знадобилося відповідно півдоби, одна доба та дві доби, щоб віддалитися від вказаного перерізу виробки на 10м. Отже фактично швидкість посування вибою еквівалентна часу відстою породного оголення після його формування виконавчим органом прохідницького комбайна.

На рис. 7 наведені графіки розподілу газового тиску у боковій стінці підготовчої виробки в залежності від швидкості посування вибою або часу. Помітно, що розподіли тиску мають випуклу форму, тобто за таких часових інтервалів тиск метану падає з прискоренням по мірі наближення до порожнини підземної виробки. Це означає, що градієнт газового тиску підтримується у кожному елементарному об'ємі масиву на початковій стадії дегазації за рахунок власних запасів сорбованого метану.

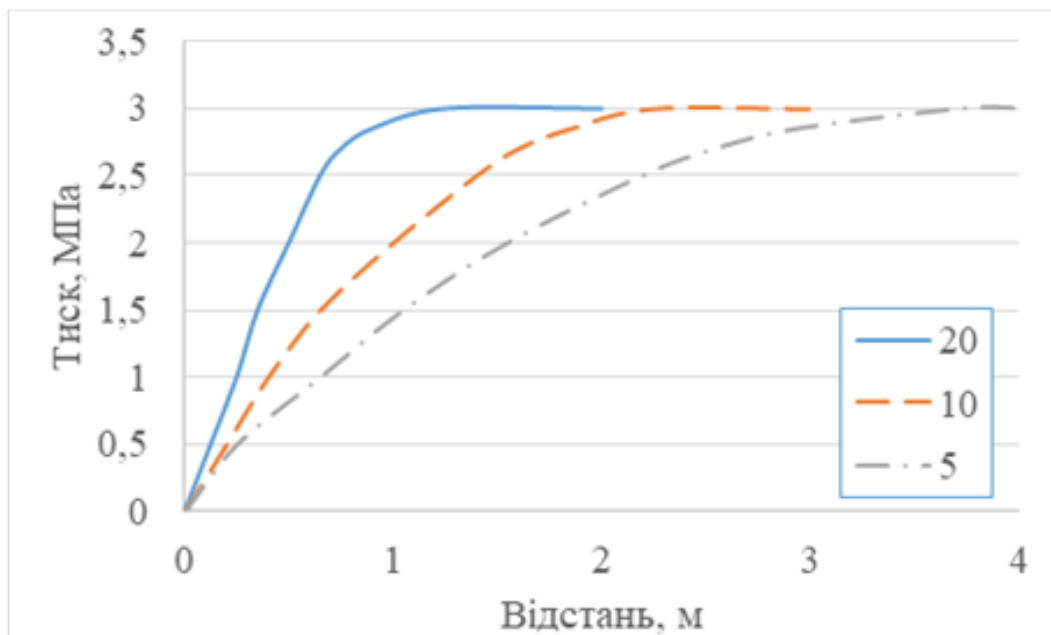


Рис. 7. Зростання газового тиску зі збільшенням відстані від стінки підготовчої виробки в глибину масиву

На рис. 8 і 9 наведена відповідно схема розташування експериментальних свердловин і результати довготривалих спостережень падіння газового тиску в шахтних умовах [3]. Експеримент виконувався в умовах шахт Печорського вугільного родовища на глибині 400м. Зі стінки підготовчої виробки були пробурені свердловини діаметром 120мм і довжиною 50 м. Центральна свердловина застосовувалась як розвантажувальна для вільного витоку з неї газу. Періодично, вимірювався дебіт метану, який вільно витікав з вказаної свердловини. Навколо центральної свердловини з інтервалом 3,5м було пробурено 10 сателітних свердловин, які були загерметизовані на довжину 20 м. У герметизованих пробках було зацементовано трубки, до яких під'єднали манометри для постійного моніторингу газового тиску. Після встановлення рівноваги газового тиску, почали знімати показання з манометрів.

Показання газового тиску знімали з інтервалом 25 діб. Як бачимо, перша стадія дегазації, протягом якої для підтримання газового градієнту використовувався власний метан, тривала майже 200 діб. Лише поспіль навколо центральної свердловини відбулось практично повне виснаження метану, й для підтримання градієнту газового тиску став використовуватися газ, що прийшов з глибинних ділянок масиву, у результаті чого настала друга стадія дегазації. Як видно з графіків, друга стадія характеризується випукло-вгнутою формою кривих розподілу газового тиску. Вгнута форма притаманна ділянкам, що примикають безпосередньо до розвантажувальної свердловини, а випукла ділянка пересунулась вглиб масиву.

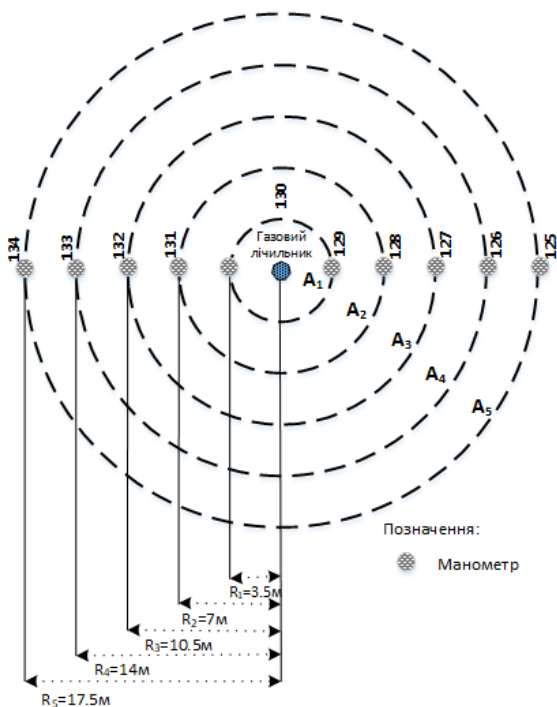


Рис. 8. Розташування експериментальних свердловин

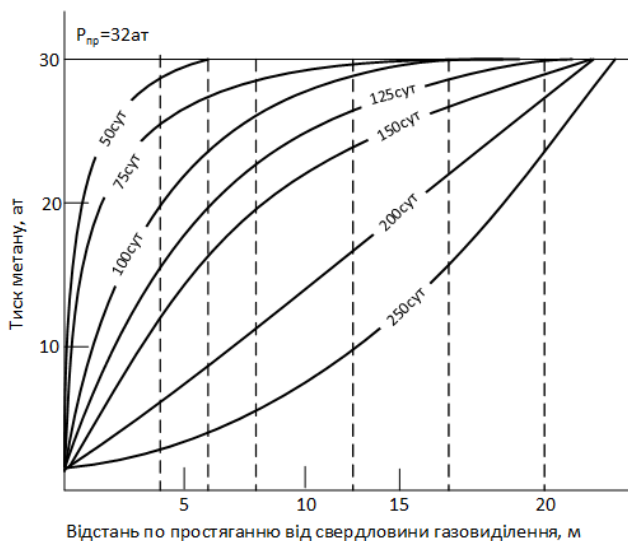


Рис. 9 Динаміка перерозподілу газового тиску з часом



Незалежно від діаметра гірничої виробки, така закономірність розподілу газового тиску є універсальною, що видно з повного якісного збігу графіків розподілу тиску у всіх трьох експериментах. Вказана закономірність має практичне значення, оскільки майже повне виснаження метану навколо свердловини є об'єктивною ознакою необхідності припинення її функціонування як видобувної. Справа у тому, що свердловини споруджують для різноманітних цілей. Частіше усього з них виконують гідродинамічну дію на пласт з метою збурення природної рівноваги й запуску процесу десорбції газу. Основне призначення свердловин може бути орієнтоване на видобуток газу (так звані видобувні свердловини) або дегазацію пласта чи виробленого простору (дегазаційні свердловини). Свердловини також використовують на вуглегазових родовищах для створення так званих екранів, які змінюють напрямок фільтрації вибухонебезпечного метану, нагнітання активних агентів у пласт з метою його активації і т.д. Саме у випадку, коли свердловини споруджують для видобутку метану, перехід з першої стадії дегазації до другої є об'єктивним сигналом для завершення роботи свердловини. Подальша її експлуатація буде недоцільною технологічно й неефективною економічно. Оцінки свідчать про те, що після досягнення довжини ділянки з вгнутою формою кривої газового тиску більш як третини від загальної глибини зони газового виснаження експлуатація свердловини у видобувному режимі є збитковою.

Вказаний критичний момент важко ідентифікувати, якщо застосувати темпи видобутку газу, оскільки дебіт метану згасає плавно. Саме зміна форми кривої газового тиску від випуклої до увігнуто-випуклої є тим об'єктивним критерієм, який дозволяє зафіксувати оптимальний час, коли доцільно припинити видобуток метану з даної свердловини. До того ж надійно встановлюється місце границі газового виснаження, що також має практичне значення з точки зору вибору оптимальної відстані між видобувними свердловинами.

Для порівняння результатів теоретичних досліджень, даних, отриманих на комп'ютерній моделі, а також результатів інструментальних спостережень у натурних умовах всі дані буди виражені у безрозмірному вигляді. Так тиск газу приводився до максимального, що існував до збурення природного стану недоторканого масиву. Відстань до виробки визначалась у діаметрах виробки (або свердловини). Час визначався в інтервалах, необхідних для пересунення точки переходу від виснаження до недоторканого стану на величину одного радіуса виробки.

Порівняння приведених таким чином даних теоретичних досліджень з результатами комп'ютерного й натурального експериментів засвідчило задовільну збіжність. Так для першої стадії дегазації розбіжність ординат кривих тиску для однакових абсцис (відстаней від виробки) не перевищила 30%, а період переходу від першої стадії до другої на теоретичній моделі й шахтному експерименті збігся у межах похибки, яка не перевищила 19%.

**Висновки.** На основі теоретичних досліджень розроблена модель дегазації товщі навколо підземної виробки, вибій якої рухається з різною швидкістю. Встановлено, що процес дегазації метану з навколишнього масиву гірських по-

рід відбувається у дві стадії. Перша стадія характеризується випуклою формою кривої згасання газового тиску по мірі наближення до контуру підземної виробки. Чим вище темпи посування вибою підземної виробки, тим більша кривизна випуклості кривої газового тиску й тим ближче точка переходу від області, що виснажена від газу до недоторканого масиву. Друга стадія дегазації починається з моменту практично повного виснаження метану у масиві, що безпосередньо примикає до порожнини виробки. Цей момент характеризується появою увігнутої форми кривої, яка описує закон зміни газового тиску.

З точки зору економічної ефективності дегазації момент зміни форми кривої з випуклої до випукло-увігнутої доцільно вважати критичним. Після цього моменту дебіт свердловини не буде доцільним для продовження експлуатації свердловини. Орієнтовно строк погашення дегазацийної свердловини повинен відповідати моменту, коли довжина увігнутої ділянки досягла третини загального радіуса газового виснаження навколо свердловини. У подальшому доцільно пробурити нову свердловину за межами газового виснаження попередньої.

Порівняння даних, отриманих за допомогою теоретичної моделі з результатами комп'ютерного та натурного експериментів показало задовільну збіжність у межах похибки, що не перевищила 19-30%.

#### **Перелік посилань**

1. Фельдман, Э.П., Калугина, Н.А., Чеснокова, О.В. (2017). *Динамика развития трещин в краевой части угольного пласта при его отработке*. Фізико-технічні проблеми гірничого виробництва. Дніпро: Інститут фізики гірничих процесів НАН України, 67-74.
2. Itasca Consulting Group. (2015). *FLAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions*. Minneapolis, MN.
3. Лидин, Г. Д., Айруни, А. Т., Бессонов, Ю. Н., Смирнов Н. С. (1969). *Исследование закономерностей дегазации разрабатываемых, подрабатываемых и надрабатываемых угольных пластов*: Науч. доклад. АН СССР. Сектор физ.-техн. горных проблем Ин-та физики Земли им. О. Ю. Шмидта. Лаборатория газоносности, газопроявлений, фильтрац. процессов и пылеподавления. Москва.

#### **АННОТАЦИЯ**

**Цель.** Целью данного исследования было изучение влияния скорости подвигания горного забоя на распределение давления метана. Это имеет большое значение с точки зрения безопасности. Нужно предотвратить опасные динамические явления, когда газ, уголь и песчаники вызывают внезапные выбросы и сильные разрушения в подземном пространстве. Для этого теоретические и численные компьютерные модели исследовали нестационарную динамику фильтрации метана в подземных выработках.

**Методика.** В теоретической модели использовано дифференциальное уравнение фильтрационного процесса и законы эластичного перераспределения напряжений при сдвиге и деформации массива горных пород. Решена сопряженная задача развития разрушения массива под действием механических напряжений и давления газа. Теоретическое решение сравнивается с числовым на базе платформы FLAC3D.

**Результаты.** Впереди движущегося забоя возникает распределение газового давления. График этого распределения представляет собой выпуклую линию. За счет увеличения скорости движения увеличивается кривизна этой линии. Со временем эта кривизна угасает и перед

горным забоем появляется такое распределение давления газа, которое описывается вогнутой линией. Момент перехода распределения от выпуклой к вогнутой форме кривой является критическим для определения оптимального периода добычи газа.

**Научная новизна.** Разработана модель дегазации слоев вокруг подземной выработки, забой которой движется с различной скоростью. Впервые был выявлен переход от выпуклых к вогнутым формам кривой, которая описывает закон изменения газового давления после критического периода, который прошел после остановки горного забоя.

**Практическое значение.** Результат исследований был использован как практическая рекомендация по добыче метана из угольных пластов. Практическая реализация исследования имеет экономическое значение, так как оптимальный момент для закрытия истощенной скважины обеспечивает минимизацию финансовых затрат на коммерческое освоение угольно-метановых месторождений. Кроме того, в целях безопасности была определена минимальная глубина отработки массива пород, которая насыщается избыточным количеством метана.

**Ключевые слова:** угольный метан, подземная выработка, угольный забой, скорость продвижения, распределение газового давления.

## ABSTRACT

**Purpose.** Purpose of this paper was to investigate impact of underground face advance on methane pressure distribution ahead of the face. This is of great importance for safety considerations to prevent dangerous dynamic events when gas, coal, and sandstone bursts and produce violent distraction and devastation in underground space. Theoretical and numerical computer models have investigated nonstationary dynamics of methane filtration in underground roadway.

**Methodology.** Theoretical model used differential equation of filtration process and laws of stress elastic redistribution during ground movement and deformation. We solved a coupled task of a fracture development under mechanical ground stresses and hydraulic pressure of the gas. Theoretical solution was compared with numerical one using FLAC3D platform.

**Findings.** The distribution of the gas pressure arises ahead of the moving face. The graph of this distribution is a convex line. By increasing the speed of movement, the curvature of this line increases. Over time, this curvature is quenched and a distribution of gas pressure appears before the mining face, which is described by a concave line. The moment of the transition of the distribution from the convex to the concave shape of the curve is critical for determining the optimum period of gas production.

**Originality** A model of degassing of layers around the underground mine has been developed, the slaughter of which moves at different rates. For the first time, the transition from convex to concave forms of the curve was revealed, which describes the law of the change in gas pressure after a critical period that passed after the stopping of the rock face.

**Practical implications.** This finding was used as practical recommendation for coalbed methane recovery from coal bearing strata. Practical implementation of the investigation has economic impact because optimal moment for closing of exhausted well provides minimization of financial expenditure for commercial development of coal-methane deposit. In addition, minimal depth of rock mass treatment that saturated with abandoned amount of methane has been determined for safety purposes.

**Key words:** *coalbed methane, underground opening, coal face, rate of advance, gas pressure distribution.*