

Раздел 1. Физика угля и горных пород

УДК 622.831:622.537.86

<https://doi.org/10.37101/ftpgp23.01.001>

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ДИФУЗІЙНОГО І ФІЛЬТРАЦІЙНОГО МЕХАНІЗМІВ ТРАНСПОРТУ МЕТАНУ НА ТРИВАЛІСТЬ ДЕСОРПЦІЇ З ВУГІЛЬНИХ ЗРАЗКІВ

В.О. Васильковський^{1*}, С.П. Мінеєв², О.М. Молчанов¹, Л.І. Стефанович¹,
О.В. Чеснокова¹

Інститут фізики гірничих процесів Національної академії наук України,
м. Дніпро, Україна

²Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії
наук України, м. Дніпро, Україна

*Відповідальний автор: e-mail: lod.vasykivskyi@ukr.net

METHOD FOR DETERMINING THE EFFECT OF DIFFUSION AND FILTRATION MECHANISMS OF METHANE TRANSPORT ON THE DURATION OF DESORPTION FROM COAL SAMPLES

V.O. Vasykivskyi^{1*}, S.P. Mineev², O.M. Molchanov¹, L.I. Stefanovich¹,
O.V. Chesnokova¹

¹Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of
Ukraine, Dnipro, Ukraine

²Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Polyakov of National Academy
of Science of Ukraine, Dnipro, Ukraine

*Corresponding author: e-mail: lod.vasykivskyi@ukr.net

ABSTRACT

Purpose. To develop a physically substantiated algorithm for determining the characteristic time of filtration and diffusion processes to assess the relative contribution of these processes to the duration of gas desorption from a porous sorbing substance.

Methods. The volumetric method was used for measurements. In the experiments, the change in methane pressure in a storage vessel (SV) of a known volume was recorded in the process of methane desorption. The measurement data became the information basis for determining the values of the characteristic desorption time from coal samples in large and small granules. Preparation for measurements consists of several stages: 1st - drying of coal at a temperature of 345 K, 2nd - saturation of coal with methane, 3rd - preliminary discharge of free compressed methane into the atmosphere from a container with coal after its saturation, and 4th - picking up the methane emitted from coal into a storage vessel. When measuring in a coal mine, the above operations are unnecessary. The analysis of the

experimental results was carried out within the framework of the model of diffusion-filtration mass transfer in a sorbing porous substance. In such a model, coal is a collection of small dense formations - blocks, the volume between which is the volume of open pores and cracks. These pores communicate with the outer surface of the coal and serve as pathways for gas filtration after diffusion from the blocks. To solve this problem, the previously discovered feature of the gas kinetics is involved, namely: in the final stage of desorption, the characteristic desorption time is a linear combination of two parameters - the characteristic times of filtration and diffusion.

Results. Formulas are obtained for the numerical calculation of the characteristic filtration and diffusion times to estimate the relative contribution of these processes to the duration of gas desorption from coal. A technique and algorithm for performing measurements in laboratory and mine conditions have been developed. The measurements showed a high sensitivity of the characteristic time of the filtration process to structural disturbances in coal. It was found that geological disturbances in the formation structure lead to a decrease in the filtration time by almost an order of magnitude. The effect is explained by an increase in coal permeability due to an increase in fracture gaping. The influence of geological disturbances on the characteristic time of diffusion processes in coal was not found.

Originality. The possibility of experimental determination the contribution for each process - filtration and diffusion - to the duration of gas desorption from coal has been theoretically substantiated and experimentally proved.

Practical implications. Such studies, carried out in laboratory conditions or directly in the mine, make it possible to predict the gas-dynamic hazard during mining operations in outburst-hazardous coal seams.

Keywords: characteristic time, desorption, filtration, diffusion, coal, volumetric method, methane pressure, coal blocks

1. ВСТУП

Інтенсивність і тривалість емісії метану з вугілля залежать від багатьох факторів: параметрів стану газу (температура, тиск і об'єм), здатності віддавати сорбований метан і транспортних характеристик вугілля. Роль перших двох факторів добре вивчена, але деталі масопереносу у вугільній речовині до сих пір не зовсім ясні. Інформація про характер руху флюїдів у вугіллі важлива, перш за все, для визначення оптимальних умов промислової розробки вугільних пластів, умов зберігання і транспортування відбитого вугілля.

Історія вивчення системи вугілля–метан показує, що в структурному відношенні кам'яне вугілля являє собою сукупність утворень – мікроблоків, вільний об'єм між якими становить об'єм відкритих пор і тріщин [1]. Зазначені пори служать шляхами евакуації газу після його дифузії з мікроблоків. Також як і при відділенні вугілля від насиченого газом пласта, в лабораторних дослідах майже весь вільний і адсорбований метан з відкритих тріщин і пор втрачається ще при розтині контейнера з вугіллям [2, 3]. Цей процес проявляється у вигляді фільтрації газу і протікає дуже швидко, якщо немає припливу газу ззовні. Слід мати на увазі, що в процесі десорбції в зразку вугілля залишається приблизно до 10% адсорбованого метану [4, 5].

Вивчаючи кінетику десорбції, ми фактично починаємо її спостереження на стадії, коли виділення газу відбувається за рахунок підживлення фільтраційних каналів молекулами газу з мікроблоків вугілля [6]. При цьому, як відомо [5], напрям градієнта тиску вільного і пов'язаного метану у привибійної частини вугільного пласта в шахтних умовах може бути різним. Ефект фільтрації газу характерний не тільки для початкової стадії десорбції. Надалі при фільтрації в порах утворюється опорний тиск, який пригнічує і «регулює» швидкість виходу газових молекул з вугільних блоків.

Характерний час витікання газу шляхом фільтрації τ^f визначається в'язкістю η газу, відкритою пористістю γ та проникністю κ вугілля, а також залежить від перепаду тиску газу $\Delta P_f(t)$ у фільтраційному каналі [7, 8]:

$$\begin{aligned} \tau^f(t) &= N^f(t) / \left[\partial N^f(t) / \partial t \right] = R^2 / D_f(t) = \\ &= R^2 \eta \gamma / (\pi^2 \kappa \Delta P_f(t)) \cdot \exp \left[-t / \tau^f(t) \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

У цьому виразі $N^f(t)$ – кількість газу у фільтраційному каналі, а $\partial N^f(t) / \partial t$ – потік газу в цьому каналі. При десорбції зі зміною величини ΔP_f відбувається зміна характерного часу фільтрації τ^f .

Характерний час дифузії газу з мікроблоків визначається як

$$\tau^d(t) = N^d(t) / \left[\partial N^d(t) / \partial t \right] = r_{mb}^2 / D_d,$$

де r_{mb} – розмір мікроблоків, $N^d(t)$ – кількість газу, пов'язаного з градієнтом концентрації метану у мікроблоці, а $[\partial N^d(t) / \partial t]$ – дифузійний потік газу з мікроблоків. Величина $\tau^d(t)$ в загальному випадку, також є функцією часу t . Це пов'язано з дисперсією розмірів мікроблоків у вугіллі і коефіцієнта дифузії D_d вздовж гранули вугілля. Зменшення перепаду тиску газу у фільтраційних каналах під час десорбції супроводжується зменшенням коефіцієнта фільтрації $D_f(t)$, а також послабленням інтенсивності газового потоку у фільтраційних каналах. В результаті цього виникають умови для балансу потоків дифузії і фільтрації. Цей баланс зберігається до закінчення десорбції.

Таким чином, є два взаємопов'язаних види транспорту молекул газу: дифузія в блоках і фільтрація у відкритих тріщинах і порах вугілля. В роботі [7] було показано, що характерний час десорбції є лінійною комбінацією характерних часів фільтрації τ^f і дифузії τ^d і може бути представлений в аналітичному вигляді:

$$\tau^{des}(t) = \tau^d(t) + \tau^f(t) [1 + U(t)]. \quad (2)$$

Тут параметр $U(t)$ визначає співвідношення кількості газу у блоках та фільтраційних каналах вугілля. Фізичний сенс отриманого виразу полягає в тому, що час десорбції всього метану з вугілля являє собою суперпозицію двох часів: часу, необхідного для повної дифузійної емісії його молекул з бло-

ків і часу, що займає наступний транспорт цих молекул по фільтраційним каналам на поверхню гранули вугілля. Значення τ^{des} у завершальній фазі десорбції визначається або графічним шляхом (як відношення кількості метану $N(t)$ у вугіллі в даний момент часу до потоку газу в цей момент), або шляхом оптимізації параметрів інтерполяційної функції, яка описує хід десорбції.

У моделі десорбції мікроблоки представляють собою області вугільного зразка які не мають відкритих пор і тріщин. Мається на увазі, що розмір r_{mb} цих областей є малим у порівнянні з розміром вугільної гранули. Крім того, за визначенням, $\tau^d(t)$ не залежить від розміру гранули. Час фільтрації $\tau^f(t)$, як витікає з (1), навпаки, залежить від цього розміру і, через $\Delta P_f(t)$, неявним чином є функцією часу t .

2. МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Розробити фізично обґрунтований алгоритм визначення характерного часу процесів фільтрації та дифузії для оцінки відносного внеску цих процесів у тривалість десорбції газу з пористої сорбуючої речовини.

3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

«Симбіоз» дифузійного і фільтраційного руху газу в вугіллі до останнього часу унеможлилював оцінку параметрів кожного з них окремо. Розробка спеціальної методики для такої оцінки стала можливою завдяки особливості кінетики газу, яка була виявлена раніше: в завершальній стадії десорбції завжди встановлюється баланс потоків дифузії і фільтрації [7]. Для отримання експериментальної інформації використовували об'ємний метод.

З виразу (2) випливає, що, визначивши τ^{des} для гранул великого R та малого r розміру, можна знайти величини, що входять у вираз (2). Для цього необхідні відомості про співвідношення характерних часів фільтрації газу в гранулах великого R і малого розміру r відповідно: $\tau_R^f(t)/\tau_r^f(t)$. Скористаємося формулою (1), згідно з якою

$$\tau_R^f(t) / \tau_r^f(t) = (R/r)^2 \left[\Delta P_f^r \exp(-t/\tau_r^f(t)) / \Delta P_f^R \exp(-t/\tau_R^f(t)) \right]. \quad (3)$$

Тут перепад тиску газу $\Delta P_f(t)$ у фільтраційних каналах є складною функцією часу, яка є різною у гранулах різних розмірів r і R . З огляду на неоднорідність густини та пористості вугілля, визначити істинні значення $\Delta P_f^f(t)$ і $\Delta P_f^R(t)$ у кожен момент часу не є можливим.

Нижче пропонується порівняно простий спосіб оцінки величини множника у квадратних дужках. Для цього слід порівняти потоки газу при його десорбції з двох рівних за масою зразків вугілля, один з яких складається з дрібних, а другий з більш великих гранул. Дійсно, фільтраційний потік газу з гранули вугілля, згідно роботи [7], визначається виразом:

$$\frac{\partial N^f(t)}{\partial t} = \frac{4\pi^3 A \cdot \kappa \cdot R}{\eta \beta} \cdot (\Delta P_f)^2 \cdot \exp(-t/\tau^f). \quad (4)$$

Звідси випливає, що відношення потоку газу з пористої гранули радіусом R до потоку газу з гранули радіусом r описується виразом:

$$\frac{\partial N_R^f(t)/\partial t}{\partial N_r^f(t)/\partial t} = \left(\frac{R}{r}\right) \cdot \frac{(\Delta P_f^R(t))^2}{(\Delta P_f^r(t))^2} \cdot \left(\exp(-t/\tau_R^f(t))/\exp(-t/\tau_r^f(t))\right). \quad (5)$$

Якщо два зразка вугілля у вигляді дрібних (r) і великих (R) гранул мають однакову масу, то співвідношення кількості цих гранул є рівним $(R/r)^3$. Тому відношення результуючих газових потоків з зазначених зразків дорівнюватиме

$$\begin{aligned} \frac{I_R(t)}{I_r(t)} &= \frac{\sum \partial N_R^f(t)/\partial t}{\sum \partial N_r^f(t)/\partial t} = \left(\frac{r}{R}\right)^3 \cdot \frac{\partial N_R^f(t)/\partial t}{\partial N_r^f(t)/\partial t} = \\ &= \left(\frac{r}{R}\right)^2 \cdot \frac{(\Delta P_f^R(t))^2}{(\Delta P_f^r(t))^2} \cdot \left(\exp(-t/\tau_R^f(t))/\exp(-t/\tau_r^f(t))\right). \end{aligned} \quad (6)$$

Тепер вираз (3) перетворюється до більш зручного вигляду:

$$\tau_R^f(t)/\tau_r^f(t) = (R/r) \cdot \sqrt{\left(I_r(t)/I_R(t)\right) \cdot \left[\exp(-t/\tau_r^f(t))/\exp(-t/\tau_R^f(t))\right]}. \quad (7)$$

Чисельні значення газових потоків $I_r(t)$ і $I_R(t)$ в (6) можна визначити, використовуючи експериментальні дані про хід десорбції метану з вугілля. У виразі (7) співвідношення $\tau_R^f(t)/\tau_r^f(t)$ характерних часів фільтрації для гранул R і r залежить від часу також через експоненційні множники, величину яких у загальному випадку визначити неможливо. Зазначена невизначеність може бути подолана шляхом штучного зміщення початкового моменту реєстрації десорбції, що дозволяє виконувати розрахунки, вважаючи $t=0$. В цьому випадку експоненти у (7) відсутні і тому обчислення спрощуються.

За умови однакового вмісту метану у двох фракціях вугілля, що є рівними за масою, рішення рівняння (3) дає для складових виразу (2) таке значення:

$$\tau_r^f(t) \cdot [1+U] = \frac{\tau_R^{des}(t) - \tau_r^{des}(t)}{W-1}; \quad (8)$$

$$\tau_R^f(t) \cdot [1+U] = \frac{W(\tau_R^{des}(t) - \tau_r^{des}(t))}{W-1}, \quad (9)$$

$$\tau^d(t) = \frac{W\tau_r^{des}(t) - \tau_R^{des}(t)}{W-1}, \quad (10)$$

$$W = \frac{R}{r} \cdot \sqrt{\frac{dP_r^{HC}(t)/dt}{dP_R^{HC}(t)/dt}}. \quad (11)$$

У формулі (11) враховано, що потік газу з вугілля пропорційний швидкості зміни тиску у накопичувальній посудині, тому справедлива рівність:

$$I_r(t)/I_R(t) = \left[\partial P_r^{HC}(t)/\partial t \right] / \left[\partial P_R^{HC}(t)/\partial t \right].$$

Таким чином, для порівняльної оцінки впливу фільтраційного і дифузійного процесів на тривалість витікання метану із вугілля необхідні:

- а) експериментальні дані про величини $\tau^{des}(t)$ характерного часу в завершальній стадії десорбції із зразків вугілля у великих та дрібних гранулах;
- б) швидкість зміни тиску в НП при десорбції з цих зразків в моменти часу, коли вміст метану у зразках однаковий.

Далі наведена методика визначення характерного часу процесів фільтрації і дифузії при нестационарному витіканні метану з вугілля.

3.1. Варіант виконання досліджень у лабораторних умовах

Для розрахунків необхідно виконати лабораторні вимірювання кінетики десорбції метану з двох зразків вугілля (у великих та дрібних гранулах) після їх попереднього насичення метаном за умов однакового тиску та провести аналіз отриманих результатів.

Лабораторне обладнання:

- дві камери насичення;
- герметична накопичувальна посудина (НП) відомого об'єму $V \approx 3000 \text{ см}^3$;
- зразковий манометр;
- форвакуумний насос;
- термокамера з автоматичною стабілізацією температури повітря;
- сита для відсіву гранул вугілля розміром 0,2–0,25 мм и 2,0–2,5 мм;
- балони зі стисненими газами: гелієм і метаном;
- термоваги;
- комп'ютер для реєстрації тиску у НП;
- електронний датчик тиску.

Для відсіву зразків вугілля використовують штиб масою не менше ніж 2 кг.

Вимірювання проводять за допомогою експериментальної установки, схема якої приведена на рис. 1. На рис. 2 показаний загальний вигляд установки.

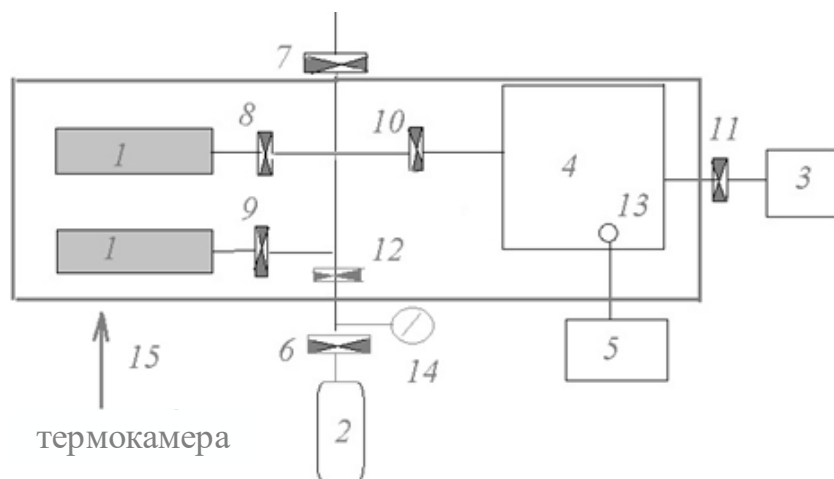


Рисунок 1. Схема установки для реєстрації десорбції метану і визначення параметрів, необхідних для розрахунку внесків процесів фільтрації і дифузії в тривалість десорбції:

1 – контейнери з вугіллям; 2 – балони з гелієм і метаном; 3 – форвакуумний насос; 4 – накопичувальна посудина (НП) відомого об'єму V; 5 – комп'ютер; 6–12 – вентилі і затискачі; 13 – електронний датчик тиску; 14 – зразковий манометр; 15 – термокамера

Послідовність операцій підготовки та виконання вимірювань.

1. Відсіяти штиб вугілля природної вологості для виділення гранул вугілля розміром $0,2 \div 0,25$ мм і $2,0 \div 2,5$ мм.
2. Сформувати два зразки вугілля з гранул розміром $2,0 \div 2,5$ мм і $0,2 \div 0,25$ мм, вагою по 20 г.
3. Висушити зразки на термовагах.
4. Закрити всі вентилі установки.
5. Засипати зразки в контейнери і герметично під'єднати контейнери до газової магістралі.
6. Відкрити вентилі 8, 9, 10 і 11.
7. Відкачати насосом 3 повітря у НП і контейнерах з вугіллям.
8. Контейнери з вугіллям «промити» гелієм. Для цього, не вимикаючи насос, перекрити вентиль 10, відкрити вентиль 12 і через вентиль 6 заповнити контейнери гелієм з балона, створивши тиск не вище 1 атмосфери. Закрити вентиль 6 і, відкривши вентиль 10, відкачати гелій з системи НП – контейнери з вугіллям протягом години.
9. Закрити вентилі 10, 11 і вимкнути насос 3. Через вентиль 6 наповнити контейнери з вугіллям метаном, створивши тиск близько 45 атм. Перекрити вентиль 6. У процесі сорбції метану вугіллям тиск газу в контейнерах 1 буде зменшуватися (показання зразкового манометра). Насичувати вугілля метаном протягом 12 діб при постійній температурі 300 ± 1 К в термокамері 15. Така тривалість насичення необхідна для того, щоб насичення вугілля у великих і дрібних гранулах було однаковим.
10. Після насичення вугілля закрити вентилі 12 і 9. Відкривши вентиль 7, протягом 10 секунд зробити скидання вільного метану з першого контейнера

в атмосферу. Закрити вентиль 7 та відкрити вентиль 10. Десорбований метан з вугілля в першому контейнері починає надходити в НП, в результаті чого тиск $P^{НП}$ наростає. Зміна тиску газу в посудині 4 щомиті реєструється датчиком тиску 13, і відповідний сигнал надходить у блок пам'яті комп'ютера 5. Діапазон вимірювань надлишкового тиску датчиком 5 обмежений величиною 100 кПа. Чутливість датчиків з аналогово-цифровим перетворювачем – менше 1 Па. Отримані дані використовуються для аналізу кінетики емісії метану.



Рисунок 2. Експериментальна установка для досліджень кінетики масопереносу і адсорбції метану

11. Вентиль 8 закрити, вентиль 11 відкрити і включити насос 3. Після вакуумування НП закрити вентилі 10 і 11.

12. Відкрити на 10 секунд вентилі 7 і 9 для скидання вільного стисненого метану з другого контейнера з вугіллям. Далі закрити вентиль 7, відкрити вентиль 10. Подібно до описаного вище в пункті 10 зареєструвати та додати у пам'ять комп'ютера дані про хід зміни тиску в НП при десорбції метану з другого контейнера.

13. Витягти з «пам'яті» експериментальні дані (дата-файли) і представити їх зображення на екрані монітора у вигляді багатьох точок, сукупність яких дає вигляд залежності тиску $P^{НП}(t)$ в НП в процесі десорбції. Характер залежності $P^{НП}(t)$ інтерполювати функцією, що представляє собою суперпозицію двох експоненційних залежностей [9]:

$$P^{HC}(t) = a(1 - \exp(-t / \tau_1^{des})) + b(1 - \exp(-t / \tau_2^{des})). \quad (12)$$

Параметри τ_1^{des} і τ_2^{des} відображають середні значення характерних часів початкової і завершальної фази десорбції, відповідно; a і b – максимальні внески кожної фази в P^{HC} . Далі в розрахунках важлива тільки інформація про час τ_2^{des} завершальної фази.

14. Як і у п. 13, слід виконати операції з дата-файлами десорбції з другого контейнера. На рис. 3а показані криві десорбції метану з вугілля марки Ж (пласт m_3 , вміст легких речовин – $V^{daf}=35\%$, щільність сухої беззолної маси вугілля – $\rho_{с.б.м.}=1,35 \text{ г/см}^3$ [10]).

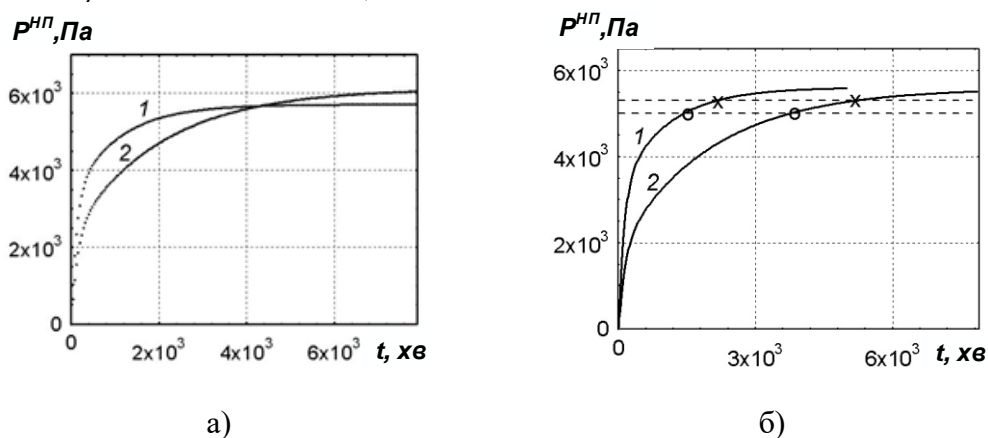


Рисунок 3.а) зміна тиску P в НП під час десорбції метану з вугілля в гранулах розміром $0,2 \div 0,25$ – крива 1 і $2,0 \div 2,5$ мм – крива 2; б) зміна тиску P в НП після приведення кривих десорбції до однакового початкового вмісту метану в вугіллі

З рис. 3а видно, що кількість газу, у зразку, який представлено дрібними гранулами вугілля, виявляється дещо меншим, ніж у зразку з гранул більшими гранулами. Це пов'язано з тим, що реєстрації десорбції завжди передують скидання тиску газу з вільного об'єму камери насичення. Паралельно з цим процесом, що займає десятки секунд, відбувається також вихід метану з вугілля. Швидкість витікання газу з дрібних гранул вище, тому до початку реєстрації десорбції в них залишається менше метану, ніж у гранулах більшого розміру. Порівняння характерних часів τ^{des} і потоків $I(t)$ для двох зразків слід проводити за умов, що вміст метану Q в обох зразках вугілля однаковий.

15. Для виконання цієї вимоги необхідно штучно затримати реєстрацію виділення метану зі зразка з гранулами R , щоб у початковий момент $t=0$ мати однакову кількість метану у зразках з гранулами, що мають розміри r і R .

16. Оригінальні дискретні дані представити у вигляді інтерполяційних функцій, які можна диференціювати. На рис. 3б наведено графіки інтерполяційних функцій вигляду (12), що мають мінімальне відхилення від експериментальних точок. Комп'ютерна оптимізація параметрів a , b , τ_1^{des} і τ_2^{des} функції (12) дає їх наступні чисельні значення:

– десорбція зі зразка у дрібних гранулах (далі r) – $a=3225$ Па; $b=2379$ Па; $\tau_1^{des}=119$ хв; $\tau_2^{des}=1049$ хв при максимальному відхиленні за ординатою від дискретних значень не більш ніж 10,5 Па;

– десорбція зі зразка у великих гранулах (далі R) – $a=1852$ Па; $b=3741$ Па; $\tau_1^{des}=140$ хв; $\tau_2^{des}=2040$ хв при максимальному відхиленні за ординатою від дискретних значень не більш ніж 10,8 Па.

Таким чином, деякі параметри, які входять до рівнянь (8), (9) та (10) вже відомі: $\tau_R^{des}=2040$ хв; $\tau_r^{des}=1049$ хв.

17. На рис. 3б у завершальній фазі десорбції кривих вибрати точки, наприклад (о), в яких вміст метану у різних фракціях вугілля однаковий. В даному випадку ці точки на кривих 1 і 2 мають координати 1440 і 3780 хвилин, відповідно.

18. Останнім кроком у вирішенні завдання повинно бути визначення величини потоку газу $dP_r^{HC}(t)/dt$ на тимчасовій позначці $t=1440$ хв для кривої 1 і потоку $dP_r^{HC}(t)/dt$ на позначці $t=2040$ хв для кривої 2.

Визначити потік газу можна графічним шляхом або за допомогою комп'ютера, якщо знайти похідну за часом для інтерполяційної функції, яка визначає хід десорбції. Результат останньої операції представлений на рис. 4.

Дата-файли величин похідних, що представлені на рис. 4, показують, що $dP_r^{HC}(t)/dt=0,57$ Па/хв, а $dP_r^{HC}(t)/dt=0,28$ Па/хв.

19. Для обчислення фільтраційних і дифузійних складових рівняння (2) є всі необхідні дані: $\tau_R^{des}=2040$ хв; $\tau_r^{des}=1049$ хв; $dP_r^{HC}(t)/dt=0,57$ Па/хв; $dP_r^{HC}(t)/dt=0,28$ Па/хв. В результаті розрахунку для W отримуємо значення $W \approx 20$. Використовуємо вирази (8), (9) і (10) для розрахунку фільтраційної і дифузійної складових характерного часу десорбції метану.

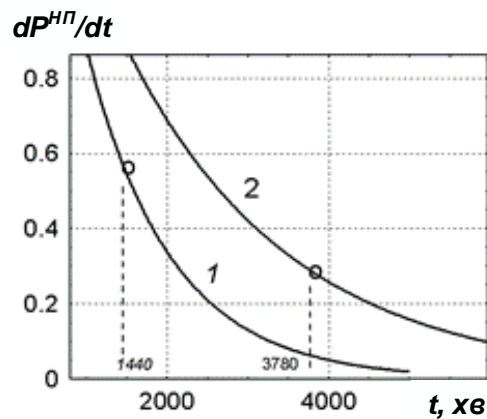


Рисунок 4. Швидкість зміни тиску P у накопичувальній посудині під час десорбції метану з вугілля у гранулах за розмірами $0,2 \div 0,25$ і $2,0 \div 2,5$ мм

Для гранул розміром r :

$$\tau_r^f(t) \cdot [1+U] = \frac{\tau_R^{des}(t) - \tau_r^{dec}(t)}{W-1} = 52 \text{ хв.}$$

Для гранул розміром R :

$$\tau_R^f(t) \cdot [1+U] = 1043 \text{ хв.}$$

Характерний час дифузії з мікроблоків вугілля:

$$\tau^d = 997 \text{ хв.}$$

Наведені вище числові характеристики відповідають їх максимальним значенням, тому що засновані на параметрах кінетики метану на завершальній стадії десорбції. Величина $\tau^d = (r_{mb})^2 / D_d$ у цій фазі залежить (крім коефіцієнта дифузії D_d) від середнього розміру r_{mb} найбільших з мікроблоків вугілля. Розмір мікроблоків може змінитися (зменшитися) після впливу на вугілля деяких видів руйнівних напружень. Тому величина τ^d у завершальній фазі десорбції метану служить для даної марки вугілля індикатором ступеню незворотних змін його структури.

Використовуючи експериментальні дані про величини τ^{des} для гранул великого R та малого r розмірів, були також отримані чисельні значення доданків виразу (2) для двох зразків вугілля марки T :

1. Вугілля, яке було вилучено у зоні впливу геологічних порушень пласта h_8 з параметрами – $V^{daf}=12\%$, $\rho_{с.б.м.}=1,4$ г/см³ [10];

2. Вугілля з пласта h_{10}^8 без геологічних порушень з параметрами – $V^{daf}=11\%$, $\rho_{с.б.м.}=1,4$ г/см³ [10].

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Результати вимірювань і розрахунків представлені у таблиці 1.

Таблиця 1. Величини фільтраційних і дифузійних складових характерного часу на завершальній стадії десорбції метану з кам'яного вугілля різних марок

Параметр	Ж	T1 (перем'ятий)	T2
$\tau_{0.2}^{des}$, хв	1049	158	166
$\tau_{2.0}^{des}$, хв	2040	409	2000
$(1+U)\tau_{0.2}^f$, хв	52	16,8	54,6
$(1+U)\tau_{2.0}^f$, хв	1043	268	1888
τ^d , хв	1002	141	111,4

5. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

З табл. 1 видно, що у зразках вугілля, представлених гранулами невеликого розміру фільтраційний ефект невеликий і час емісії метану визначається, в основному, часом дифузійного процесу у мікроблоці. Великий час τ^d у вугіллі марки Ж вказує на великий внесок процесів дифузії молекул газу у мікроблоках вугілля. У вугіллі марки «Т», навпаки, дифузія відбувається порівняно швидко, а тривалий час емісії метану з вугілля обумовлено, в основному, часом руху газу у фільтраційних каналах.

Вплив геологічних порушень на кінетику десорбції метану можна побачити порівнявши фільтраційні і дифузійні характеристики вугілля «Т1» і «Т2» в гранулах 2,0–2,5 мм. Найбільш показовими є дані для вугілля у великих гранулах. Тут порушення в структурі вугілля «Т1» призводять до зменшення часу фільтрації майже на порядок. Це свідчить про зростання проникності k

за рахунок збільшення з'являння тріщин в порушеному вугіллі. Зміни макроструктури вугілля, мабуть, не впливають на розмір і структуру мікроблоків. Таке припущення ґрунтується на тому, що часи дифузії $\tau^d = r_{mb}^2 / D_d$ з мікроблоків вугілля «Т1» і «Т2» розрізняються незначно.

Виходячи з цього розглянемо варіант виконання вимірювань у шахтних умовах.

Для вимірювань використовуються два контейнери однакового об'єму ($V \approx 1000 \text{ см}^3$). Кожен контейнер забезпечений манометром для вимірювання надлишкового тиску до 30 кПа ($\approx 0,3 \text{ атм}$).

На рис. 5а і 5б показані схема передбачуваного вимірювального пристрою та його прототип.

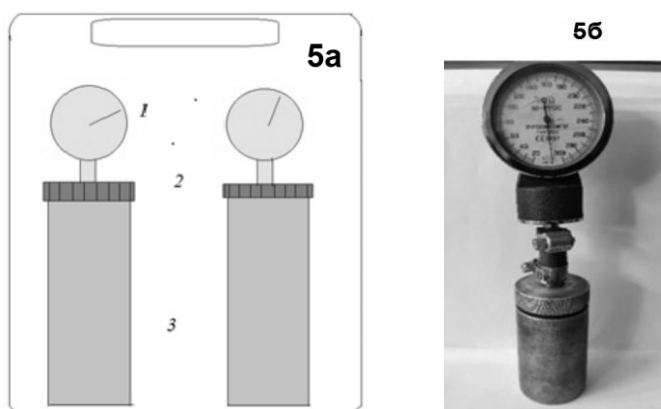


Рисунок 5. Варіанти десорбметра:

а) схема переносного шахтного десорбметра: 1 – манометр, 2 – запорна гайка, 3 – контейнери з вугіллям; 4 – переносна касета; б) прототип

Порядок операцій з підготовки та виконання вимірювань

1. Відсіяти штиб вугілля природної вологості для виділення гранул вугілля розміром $0,2 \div 0,25 \text{ мм}$ та $2,0 \div 2,5 \text{ мм}$.

2. Сформувати два зразки вугілля масою по 10 г та засипати кожен з них в окремий контейнер.

3. Щільно закрутити гайки на контейнерах та увімкнути таймер (секундомір). Десорбований з вугілля метан починає надходити у вільний обсяг (ВО) контейнерів, в результаті чого тиск в ВО зростає. Протягом перших 30-ти хвилин реєструвати зміну тиску газу у ВО з інтервалом 2 хвилини. Дані реєстрації (час і тиск) заносити у журнал. В подальшому інтервали збільшити до 5–10 хв. Реєстрацію продовжувати доки приріст тиску у контейнері буде незмінним протягом 10 хв.

4. Повторити операції зазначені у п.п. 16–19 і зробити необхідні розрахунки параметрів: W , $\tau_r^f(t) \cdot [1+U]$, $\tau_R^f(t) \cdot [1+U]$ і τ^d .

Перевага даного варіанту полягає у тому, що відпадає необхідність висушувати та насичувати вугілля метаном, а початковий вміст вологи і метану в двох зразках однаковий. Недолік полягає в меншій точності реєстрації перебігу десорбції.

6. ВИСНОВКИ

Фізично обґрунтовано та аналітично встановлено алгоритм вирішення важливого завдання – визначення характерного часу процесів фільтрації і дифузії для нестационарної емісії метану з вугілля. Використання викладеної вище методики дозволяє оцінити відносний внесок дифузійного та фільтраційного механізмів у тривалість десорбції газу з пористої сорбуючої речовини. Зокрема, для викопного вугілля у гранулах розміром більших ніж 2,5 мм ефект фільтрації у тріщинах, які утворені прошарками осадових порід, збільшує тривалість емісії метану з вугілля марки «Ж» в 2 рази, а з вугілля марки «Т» пласта h_{10}^8 майже в 20 разів.

Таким чином, час дегазації вугілля можна скоротити шляхом його подрібнення (послаблюється ефект фільтрації) або зволоження вугільного пласта (зменшується енергія зв'язку метану з вугіллям [11]). Авторами пропонується використовувати даний матеріал в якості обґрунтування для розробки експериментального десорбційного приладу, який дозволить визначати десорбційно-фільтраційні параметри привибійної частини вугільного пласта. Останнє дозволить з достатньою надійністю виконувати прогноз газодинамічної небезпеки у вибої під час проведення гірничих робіт на викидонебезпечних вугільних пластах.

Методика може бути корисна для визначення оптимальних умов промислової розробки вугільних пластів, умов зберігання та транспортування відбитого вугілля, а також у разі наближення до області геологічних порушень вугільних пластів.

Робота виконана у рамках наукових досліджень за цільовою програмою «Дослідження особливостей ієрархічної пористої структури та сорбційних властивостей вугільної речовини для оцінки ресурсів та перспектив утилізації метану з вуглепородного масиву».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Алексеев А.Д. (2010). *Физика угля и горных процессов*. Киев: Наук. думка.
2. Васильковский В.А., Минеев С.П. (2017). Распределение и механизмы движения метана в блоках угля. *Физико-технические проблемы горного производства*, (19), 19–33. <http://dSPACE.nbuv.gov.ua/handle/123456789/141931>
3. Васильковский В.А., Минеев С.П. (2009). Некоторые закономерности перемещения метана по факталам угольного вещества. *Геотехнічна механіка*, (138), 93–107. <http://dSPACE.nbuv.gov.ua/handle/123456789/158658>
4. Минеев С.П. (2009). Свойства газонасыщенного угля. *Днепропетровск: НГУ*.
5. Минеев С.П., Прусова А.А., Корнилов М.Г. (2007). Активация десорбции метана в угольных пластах. *Донецк: Вебер*.
6. Алексеев А.Д., Васильковский В.А., Шажко Я.В. (2007). О распределении метана в каменном угле. *Физико-технические проблемы горного производства*, (10), 29–38. <http://dSPACE.nbuv.gov.ua/handle/123456789/107669>
7. Васильковский В.А., Калугина Н.А., Молчанов А.Н. (2006). Фазовые состояния и механизмы десорбции метана из угля. *Физико-технические проблемы горного производства*, (9), 62–70. <http://dSPACE.nbuv.gov.ua/handle/123456789/107636>

8. Лейбензон Л.С. (1947). Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М.-Л.: ОГИЗ.
9. Васильковский В.А., Ульянова Е.В. (2006). Некоторые аспекты интерпретации кинетики десорбции метана из каменного угля. *Физико-технические проблемы горного производства*, (9), 56–61. <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/107635>
10. Васильковский В.А. (2013). Сорбционный объём и пустотность каменных углей. *Физико-технические проблемы горного производства*, (16), 18–32. <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/108262>
11. Васильковский В.А., Стефанович Л.И., Чеснокова О.В. (2020). Влияние естественной влажности на характерное время десорбции метана из углей различной степени метаморфизма. *Вісті Донецького гірничого інституту*, (2), 23–32. doi:10.31474/1999-98X-2020-2-23-32

REFERENCES

1. Alekseyev A.D. (2010). *Fizika uglya i gornyykh protsessov*. Kiev: Nauk. dumka.
2. Vasil'kovskiy V.A., Mineev S.P. (2017). Raspredeleniye i mekhanizmy dvizheniya metana v blokakh uglya. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy gornogo proizvodstva*, (19), 19–33. <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/141931>
3. Vasil'kovskiy V.A., Mineev S.P. (2009). Nekotoryye zakonomernosti peremeshcheniya metana po fraktalam ugol'nogo veshchestva. *Heotekhnichna mekhanika*, (138), 93–107. <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/158658>
4. Mineev S.P. (2009). Svoystva gazonasyshchennogo uglya. *Dnepropetrovsk: NGU*.
5. Mineev S.P., Prusova A.A., Kornilov M.G. (2007). Activation of methane desorption in coal seams. *Donetsk: Weber*.
6. Alekseyev A.D., Vasil'kovskiy V.A., Shazhko YA.V. (2007). O raspredelenii metana v kamennom ugle. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy gornogo proizvodstva*, (10), 29–38. <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/107669>
7. Vasil'kovskiy V.A., Kalugina N.A., Molchanov A.N. (2006). Fazovyye sostoyaniya i mekhanizmy desorbtsii metana iz uglya. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy gornogo proizvodstva*, (9), 62–70. <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/107636>
8. Leybenzon L.S. (1947). Dvizheniye prirodnykh zhidkostey i gazov v poristoy srede. М.-Л.: ОГИЗ.
9. Vasil'kovskiy V.A., Ul'yanova Ye.V. (2006). Nekotoryye aspekty interpretatsii kinetiki desorbtsii metana iz kamennogo uglya. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy gornogo proizvodstva*, (9), 56–61. <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/107635>
10. Vasil'kovskiy V.A. (2013). Sorbtsionnyy ob'yom i pustotnost' kamennykh ugley. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy gornogo proizvodstva*, (16), 18–32. <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/108262>
11. Vasil'kovskiy V.A., Stefanovich L.I., Chesnokova O.V. (2020). Vliyaniye yestestvennoy vlazhnosti na kharakternoye vremya desorbtsii metana iz ugley razlichnoy stepeni metamorfizma. *Visti Donets'koho hirnychoho instytutu*, (2), 23–32. doi:10.31474/1999-98X-2020-2-23-32

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Розробити фізично обґрунтований алгоритм визначення характерного часу процесів фільтрації та дифузії для оцінки відносного внеску цих процесів у тривалість десорбції газу з пористої сорбуючої речовини.

Методика. Для вимірювань використовували об'ємний метод. В експериментах реєстрували зміну тиску метану в накопичувальній посудині (НП) відомого об'єму в процесі десорбції метану. Дані вимірювань стали інформаційною основою для визначення величин характерного часу десорбції зі зразків вугілля у великих та дрібних гранулах. Підготовка до вимірювань складається з декількох етапів: 1-й – висушування вугілля при температурі 345 К, 2-й – насичення вугілля стисненим метаном, 3-й – попереднє скидання в атмосферу вільного стисненого метану з контейнера з вугіллям після його насичення і 4-й – збір метану, що виділяється вугіллям, у накопичувальну посудину. При вимірах в умовах вугільної шахти необхідність у зазначених операціях відповідає. Аналіз експериментальних результатів проводили в рамках моделі дифузійно-фільтраційного масопереносу у сорбуючій пористій речовині. У такій моделі кам'яне вугілля являє собою сукупність дрібних щільних утворень – блоків, об'єм між якими складається з відкритих тріщин та пор. Зазначені пори сполучаються зі зовнішньою поверхнею вугілля та служать шляхами фільтрації газу після його дифузії з блоків. Для вирішення поставленої задачі була залучена особливість кінетики газу, яка виявлена раніше, а саме: в завершальній стадії десорбції характерний час десорбції являє собою лінійну комбінацію двох параметрів – характерних часів фільтрації і дифузії.

Результати. Отримано формули для чисельного розрахунку величин характерних часів фільтрації та дифузії для оцінки відносного внеску цих процесів у тривалість десорбції газу з вугілля. Розроблено методику та алгоритм виконання вимірювань у лабораторних та шахтних умовах. Вимірювання показали високу чутливість характерного часу фільтраційного процесу до структурних порушень у вугіллі. Виявлено, що геологічні порушення у структурі пласта призводять до зменшення часу фільтрації майже на порядок. Ефект пояснюється зростанням проникності вугілля за рахунок збільшення з'явлення тріщин. Вплив геологічних порушень на характерний час дифузійних процесів у вугіллі не виявлено.

Наукова новизна. Теоретично обґрунтовано та експериментально доведено можливість експериментального визначення вкладу кожного процесу – фільтрації та дифузії – у тривалість десорбції газу з вугілля.

Практична значимість. Подібні дослідження, які виконуються у лабораторних умовах або безпосередньо у шахті, дозволяють робити прогноз газодинамічної небезпеки під час проведення гірничих робіт на викидонебезпечних вугільних пластах.

Ключові слова: характерний час, десорбція, фільтрація, дифузія, вугілля, об'ємний метод, тиск метану, блоки вугілля

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Установить физически обоснованный алгоритм определения характерного времени процессов фильтрации и диффузии для оценки относительного вклада этих процессов в продолжительность десорбции газа из пористого сорбирующего вещества.

Методика. Для измерений использовали объёмный метод. В экспериментах регистрировали изменение давления метана в накопительном сосуде (НС) известного объёма в процессе десорбции метана. Данные измерений стали информационной основой для определения величин характерного времени десорбции из образцов угля в крупных и мелких гранулах. Подготовка к измерениям имеет нескольких этапов: 1-й – высушивание угля при температуре 345 К, 2-й – насыщение угля сжатым метаном, 3-й – предварительный сброс в атмосферу свободного сжатого метана из контейнера с углем после его насыщения и 4-й – сбор метана, выделяемого углем в накопительный сосуд. При измерениях в условиях угольной шахты необходимость в указанных операциях отпадает. Анализ экспериментальных результатов проводили в рамках модели диффузионно-фильтрационного массопереноса в сорбирующем пористом веществе. В такой модели каменный уголь представляет собой совокупность мелких плотных образований – блоков, объём между которыми составляет объём открытых пор и трещин. Указанные поры сообщаются с внешней поверхностью угля и служат путями фильтрации газа после его диффузии из блоков. Для решения поставленной задачи привлечена обнаруженная ранее особенность кинетики газа, а именно: в завершающей стадии десорбции характерное время десорбции представляет собой линейную комбинацию двух параметров – характерных времен фильтрации и диффузии.

Результаты. Получены формулы для численного расчета величин характерного времени фильтрации и диффузии для оценки относительного вклада этих процессов в продолжительность десорбции газа из угля. Разработана методика и алгоритм выполнения измерений в лабораторных и шахтных условиях. Измерения показали высокую чувствительность характерного времени фильтрационного процесса к структурным нарушениям в угле. Обнаружено, что геологические нарушения в структуре пласта приводят к уменьшению времени фильтрации почти на порядок. Эффект объясняется ростом проницаемости угля за счет увеличения зияния трещин. Влияние геологических нарушений на характерное время диффузионных процессов в угле не обнаружено.

Научная новизна. Теоретически обоснована и экспериментально доказана возможность экспериментального определения вклада каждого процесса – фильтрации и диффузии – в продолжительность десорбции газа из угля.

Практическая значимость. Подобные исследования, выполняемые в лабораторных условиях или непосредственно в шахте, позволяют делать прогноз газодинамической опасности при ведении горных работ на выбороопасных угольных пластах.

Ключевые слова: характерное время, десорбция, фильтрация, диффузия, уголь, объёмный метод, давление метана, блоки угля

ABOUT AUTHORS

Vasylykivskiy Vsevolod, Doctor of Technical Science, Department Head, Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, 2A Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49600. E-mail: lod.vasylykivskiy@ukr.net

Mineev Sergey, Doctor of Technical Science, Professor, Department head, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine, 2A Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49600. E-mail: sergmineev@gmail.com

Molchanov Oleksandr, Doctor of Technical Science, Director, Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2A Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49600. E-mail: an_mol@ukr.net

Stefanovich Leonid, Doctor of Physics and Mathematics, Deputy Director of the Institute for Scientific Work, Institute for Physics of Mining Processes National Academy of Sciences of Ukraine, 2A Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49600. E-mail: listef2591@ukr.net

Chesnokova Oksana, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Department of Physics of Coal and Rock, Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2A Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49600. E-mail: chesnokova0507@gmail.com