

**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСПОРТУ МЕТАНУ
У ВИКОПНОМУ ВУГІЛЛІ ПРИ ДЕСОРБЦІЇ****В. О. Васильковський, О. В. Чеснокова**

Інститут фізики гірничих процесів Національної Академії Наук України

вул. Симферопольська, 2а, м. Дніпро, 49600, Україна. E-mail: chesnokova0507@gmail.com

За допомогою методів механіки рідин і газу у поєднанні з сорбційними експериментами по визначенню параметрів десорбції метану з вугілля розроблений метод визначення характерних часів дифузії і фільтрації метану при його виході з викопного вугілля. Отриманий аналітичний вираз для характерного часу десорбції в її завершальній стадії, дозволив отримати кількісні оцінки характерних часів фільтрації і дифузії для вугілля різної міри метаморфізму. Були використані дослідні дані, отримані в результаті проведення експериментів по насиченню метаном зразків вугілля різних фракцій в камері високого тиску з подальшою реєстрацією його виходу в посудину відомого об'єму. Виявлено, що час емісії метану з вугілля марок Д і Ж визначається, в основному, дифузійним процесом. Це вказує на дифузію молекул газу в щільній речовині вугілля. У антрациті, навпаки, дифузія відбувається порівняно швидко, а основний час виходу метану з вугілля обумовлений часом руху газу у фільтраційних каналах. Отримана інформація про величини коефіцієнтів дифузії, які вільні від домішки фільтраційних ефектів, супутніх десорбції з вугілля. Виявлено, що коефіцієнт дифузії зростає із зростанням метаморфізації вугілля. У вугіллі з малим вмістом летких речовин в антрациті коефіцієнт дифузії стає на один-два порядку більше, що можна пояснити домішкою поверхневої дифузії в мікропорах і перехідних порах. Виявлена зміна масштабного ефекту для десорбції в метаморфічному ряду вугілля. Отримані результати важливі для роздільної оцінки дифузійних і фільтраційних параметрів транспорту метану у викопному вугіллі при десорбції, які використовуються для опису порівняльних характеристик параметрів транспорту метану у вугіллі різних шахтопластів, у вугіллі зон геологічних порушень, а також газодинамічних зон. Визначення характеристик десорбції вугілля дозволить удосконалити методи оцінки безпечної роботи вугільних підприємств і оцінювати можливість його видобутку в якості супутнього енергоносія.

Ключові слова: метан, вугілля, дифузія, фільтрація, десорбція, метаморфізація.**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПОРТА МЕТАНА
В ИСКОПАЕМОМ УГЛЕ ПРИ ДЕСОРБЦИИ****В. А. Васильковский, О. В. Чеснокова**

Інститут фізики горних процесів Національної академії наук України

ул. Симферопольская, 2а, г. Днепр, 49600, Украина. E-mail: chesnokova0507@gmail.com

С помощью методов механики жидкостей и газа в сочетании с сорбционными экспериментами по определению параметров десорбции метана из угля разработан метод определения характерных времён диффузии и фильтрации метана при его выходе из ископаемых углей. Полученное аналитическое выражение для характерного времени десорбции в её заключительной стадии, позволило получить количественные оценки характерных времен фильтрации и диффузии для углей разной степени метаморфизма. Были использованы опытные данные, полученные в результате проведения экспериментов по насыщению метаном образцов угля разных фракций в камере высокого давления с дальнейшей регистрацией его выхода в сосуд известного объёма. Обнаружено, что время эмиссии метана из углей марок Д и Ж определяется, в основном, диффузионным процессом. Это указывает на диффузию молекул газа в плотном веществе угля. В антраците, наоборот, диффузия происходит сравнительно быстро, а основное время выхода метана из угля обусловлено временем движения газа в фильтрационных каналах. Получена информация о величинах коэффициентов диффузии, которые свободны от примеси фильтрационных эффектов, сопутствующих десорбции из углей. Обнаружено, что коэффициент диффузии возрастает с ростом метаморфизации углей. В углях с малым содержанием летучих веществ и антраците коэффициент диффузии становится на один-два порядка больше, что можно объяснить примесью поверхностной диффузии в микропорах и переходных порах. Выведено изменение масштабного эффекта для десорбции в метаморфическом ряду углей. Полученные результаты важны для раздельной оценки диффузионных и фильтрационных параметров транспорта метана в ископаемом угле при десорбции, которые используются для описания сравнительных характеристик параметров транспорта метана в угле разных шахтопластов, в угле зон геологических нарушений, а также газодинамических зон. Определение десорбционных характеристик угля позволит совершенствовать методы оценки безопасной работы угольных предприятий и оценивать возможность его добычи в качестве сопутствующего энергоносителя.

Ключевые слова: метан, уголь, диффузия, фильтрация, десорбция, метаморфизация.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Дослідження явища виділення метану з вугільних пластів диктується необхідністю розробки заходів для попередження утворення вибухонебезпечних концентрацій метану в гірських виробках і газодинамічних явищ при відпрацюванні вугільних родовищ. Крім того, метан, що міститься у вугільних пластах і вугільнопород-

них масивах, можна розглядати в якості альтернативного або, як мінімум, супутнього енергоносія. Тому вивчення закономірностей інтенсивності газового потоку, що виділяється при видобутку і зберіганні вугілля, є актуальним.

Вивільнення метану при веденні гірських робіт на вугільних шахтах залежить від безлічі природних

і техногенних чинників: кількості газу в пласті, розподілу його між різними фазовими станами, пористості (відкритої і закритої), газопроникності пласта та ін. [1].

В ІФГП НАН України були побудовані фізико-математичні моделі витікання метану з вугілля у відкритий простір і замкнутий об'єм, що базуються на наступних уявленнях про входження метану у вугільну речовину [2]. Метан у вугільному пласті знаходиться:

- у вільному газоподібному стані у фільтраційному об'ємі вугілля, тобто в системі пор, тріщин і каналів, що сполучаються із зовнішньою поверхнею вугільного пласта;

- в адсорбційній плівці на поверхні вугільної речовини;

- у вигляді твердого розчину в об'ємі блоків, не порушених відкритою пористістю. В цьому випадку необхідно уточнити, що усередині кожного блоку є система закритих пор (що не сполучаються каналами з фільтраційним об'ємом), в яких метан знаходиться як в газоподібному стані, так і в адсорбованому, - на поверхні пор.

При порушенні рівноважного стану (наприклад, при виникненні зони розвантаження) метан спрямовується в зону меншого тиску. Відбувається витікання газу з фільтраційного об'єму. При цьому виникає приплив його до тріщин з блоків шляхом твердотілої дифузії у блоках. Таким чином, ми маємо два процеси: ведучий - фільтрацію газу в тріщинах і макропорах, що підкоряється звичайному закону Дарсі, і ведений - приплив газу у фільтраційний об'єм з блоків шляхом твердотілої дифузії у блоках [3].

Важливість розробки рекомендацій за оцінкою фільтраційних і дифузійних параметрів кам'яного вугілля обумовлена необхідністю оцінювати час утворення небезпечних концентрацій метану в очисних вибоях [4], тупикових виробках у випадках аварійного відключення вентиляції [5] чи процесах тріщиноутворення в результаті розвантаження вугільного пласта від гірського тиску, що може привести до раптового руйнування його крайової частини [6].

Мета роботи розробити фізично обґрунтований метод визначення характерних часів дифузії і фільтрації метану при десорбції з вкопного вугілля.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Багато дослідників залишають на другому плані інший механізм виділення газу - твердотілу дифузію з блоків, вважаючи цей процес повільним, не здатним забезпечити інтенсивний потік газу, а результат його дії довготривалим.

Наші дослідження [7] свідчать про зворотний: при малих розмірах гранул вугілля час десорбції метану визначається, в основному, дифузійними характеристиками сорбенту.

Окрім цього, характерний час дифузії може служити, свого роду, індикатором виду напруженого стану гірського масиву, оскільки цей час прямо залежить від виду деформацій, яким підданий масив.

Так, в роботі [8], де вивчалася десорбція метану з вугілля, підданому дії об'ємної нерівнокомпонентної напруги, показано, що деякий вид напруги (стискування або розтягування із зрушенням) призводить до зміни не лише фільтраційних, але і дифузійних параметрів десорбції.

Враховуючи практичне значення виявленої кореляції, стає зрозумілою важливість розробки рекомендацій з оцінки дифузійних параметрів кам'яного вугілля.

У рамках дифузійно-фільтраційної моделі руху метану у вкопному вугіллі виконаємо кількісну оцінку складових характерного часу десорбції. В якості експериментальної бази застосуємо отримані нами дані про кінетику десорбції метану з чотирьох зразків вугілля різного рівня метаморфізації.

Методика експериментів включала насичення вугілля фракцій 0,2-0,25мм і 2,0-2,5мм метаном при температурі 300К в камері високого тиску впродовж десятих діб. Виміри подальшої десорбції робили в посудину відомого об'єму. Реєстрація і візуальне спостереження кінетики заповнення посудини відбувалося в режимі реального часу з інтервалом 0,65 с.

У публікаціях [7, 9] показано, що аномальна залежність часу десорбції від розміру гранул вугілля пов'язана з гібридним механізмом виходу газу, що є певним видом суперпозиції дифузії і фільтрації.

Газ шляхом дифузії із закритих пор в мікроблоках, розмір яких - r_{mb} - багато менше розміру гранул вугілля, поступає у відкриті пори і тріщини, в яких він, рухається далі до поверхні вугілля, шляхом фільтрації. Остання призводить до залежності густини потоку газу і часу його витікання від середньої довжини R , тобто радіусу гранул вугілля, і інших характеристик фільтраційних каналів.

Характерний час фільтрації τ_f визначається в'язкістю η газу, відкритою пористістю γ і проникністю k вугілля, а також залежить від перепаду тиску газу $\Delta P_f(t)$ у фільтраційному каналі [9,10]:

$$\tau_f(t) = \frac{N_f(t)}{\left[\frac{\partial N_f(t)}{\partial t} \right]} = \frac{R^2}{D_f(t)} = \frac{R^2 \eta \gamma}{\pi^2 k \Delta P_f(t) \exp\left(-\frac{t}{\tau_f(t)}\right)} \quad (1)$$

У цьому виразі $N_f(t)$ - кількість газу у фільтраційному каналі, а $\frac{\partial N_f(t)}{\partial t}$ - потік газу в цьому каналі.

При десорбції зі зміною величини ΔP_f відбувається зміна значення τ_f . Характерний час дифузії газу з мікроблоків визначається як

$$\tau_d(t) = \frac{N_d(t)}{\left[\frac{\partial N_d(t)}{\partial t} \right]} = \frac{r_{mb}^2}{D_d}$$

де $N_d(t)$ - кількість газу, пов'язаного з градієнтом концентрації метану в мікроблоках, а $\left[\frac{\partial N_d(t)}{\partial t} \right]$ - дифузійний потік газу. Величина $\tau_d(t)$ в загальному випадку, також є функцією часу t . Це пов'язано з дисперсією розміру мікроблоків у вугіллі і коефіцієнта дифузії D_d по гранулі вугілля.

Зменшення перепаду тиску газу у фільтраційних порах при десорбції супроводжується зменшенням параметра фільтрації $D_f(t)$, послабленням інтенсивності газового потоку у фільтраційних каналах, внаслідок чого виникають умови для балансу потоків дифузії і фільтрації. Цей баланс витримується до закінчення десорбції.

Таким чином, увесь процес десорбції умовно розділяється на дві фази: першу - фазу процесів, передуючих встановленню балансу потоків, і другу - фазу, коли джерелом газу, що виділяється вугіллям, є тільки його дифузія із закритих пор у відкриті пори.

У роботі [9] показано, що при балансі дифузійного і фільтраційного потоків характерний час емісії (десорбції) метану з кам'яного вугілля описується виразом

$$\tau_{dec}(t) = \tau_f(t)(1+U) + \tau_d, \quad (2)$$

де коефіцієнт U характеризує співвідношення кількості газу в мікроблоках і у відкритих порах вугілля.

Значення τ_{dec} у завершальній фазі десорбції визначається або графічним шляхом (як відношення кількості метану $N(t)$ у вугіллі в даний момент часу до потоку газу з вугілля:

$$\tau_{dec}(t) = \frac{N(t)}{\partial N(t)/\partial t}$$

або, за допомогою комп'ютерної програми EasyPlot (Eрw32), шляхом оптимізації параметрів інтерполяційної функції, що описує хід десорбції.

У даній моделі десорбції мікроблоки є областями вугільного зразка, що не мають відкритих пор і тріщин. Розмір цих областей передбачається малим в порівнянні з розміром гранули вугілля.

Якщо для опису ходу десорбції, використовується інтерполяційна функція у вигляді однієї експоненти, то в такому наближенні час дифузії τ_d не залежить від часу. Окрім цього, за визначенням τ_d не залежить від розміру гранули.

Час фільтрації $\tau_f(t)$, як впливає з (1), навпаки, залежить від цього розміру і неявним чином, через $\Delta P_f(t)$, є функцією часу t .

З виразу (2) витікає також, що, визначивши τ_{dec} для гранул великого R і малого r розміру, можна знайти величини, що становлять вирази (2). Для цього потрібні відомості про співвідношення характерних часів фільтрації газу в гранулах R і r : $\tau_{fR}(t)/\tau_{fr}(t)$. Скористуємось формулою (1), згідно якої

$$\frac{\tau_{fR}(t)}{\tau_{fr}(t)} = \frac{R^2}{r^2} \left[\frac{\Delta P_{fr}(t) \exp\left(-\frac{t}{\tau_{fr}(t)}\right)}{\Delta P_{fR}(t) \exp\left(-\frac{t}{\tau_{fR}(t)}\right)} \right]. \quad (3)$$

Тут перепад тиску газу $\Delta P_f(t)$ у фільтраційних каналах є складною функцією часу, яка неоднакова в гранулах розміром r і R . У вугіллі із-за його неоднорідної щільності і пористості визначити істинні значення $\Delta P_{fr}(t)$ і $\Delta P_{fR}(t)$ у кожен момент часу не видається можливим.

Нижче пропонується порівняно простий спосіб оцінки величини множника в квадратних дужках. Для цього слід порівняти потоки газу при його десорбції з двох рівних по масі зразків вугілля, один з яких складений з дрібних, а другий з більших гранул. Дійсно, фільтраційний потік газу з гранули вугілля, згідно [9], визначається виразом:

$$\frac{\partial N_f(t)}{\partial t} = \frac{4\pi^3 A \kappa R}{\eta \beta m_0} \Delta P_f^2(t) \exp\left(-\frac{t}{\tau_f(t)}\right),$$

де m_0 – маса молекули метану, $\tau_f(t)$ – характерний час фільтрації, а β – коефіцієнт пропорціональності між тиском газу і його густиною.

Звідси витікає, що відношення потоку газу з пористої гранули радіусом R до потоку газу з гранули радіусом r описується формулою:

$$\frac{\partial N_{fR}(t)/\partial t}{\partial N_{fr}(t)/\partial t} = \frac{R}{r} \frac{\Delta(P_{fR}(t))^2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{fR}(t)}\right)}{\Delta(P_{fr}(t))^2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{fr}(t)}\right)}.$$

У разі, коли два зразки вугілля у вигляді дрібних (r) і великих (R) гранул мають однакову масу, співвідношення кількості цих гранул однакове $(R/r)^3$. Враховуючи цю обставину, відношення результируючих газових потоків з вказаних зразків буде дорівнювати

$$\begin{aligned} \frac{I_R(t)}{I_r(t)} &= \frac{\sum_R \partial N_{fR}(t)/\partial t}{\sum_r \partial N_{fr}(t)/\partial t} = \frac{r^3}{R^3} \frac{\partial N_{fR}(t)/\partial t}{\partial N_{fr}(t)/\partial t} = \\ &= \frac{r^2}{R^2} \frac{\Delta(P_{fR}(t))^2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{fR}(t)}\right)}{\Delta(P_{fr}(t))^2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{fr}(t)}\right)}. \end{aligned}$$

Тут символами $I_r(t)$ і $I_R(t)$ позначені результуючі потоки газу з однакових по масі навісок вугілля в гранулах розміром r і R . Використовуючи останню формулу, можна перетворити вираз (3) до зручнішого виду:

$$\frac{\tau_{fR}(t)}{\tau_{fr}(t)} = \frac{R}{r} \sqrt{\frac{I_r(t) \exp\left(-\frac{t}{\tau_{fr}(t)}\right)}{I_R(t) \exp\left(-\frac{t}{\tau_{fR}(t)}\right)}}. \quad (4)$$

Чисельні значення газових потоків $I_r(t)$ і $I_R(t)$ у (4) легко визначити, використовуючи експериментальні дані про хід десорбції метану з вугілля.

Однак, з виразу (4) видно, що співвідношення $\tau_{fR}(t)/\tau_{fr}(t)$ характерних часів фільтрації для гранул R і r залежить від часу також через експоненціальні множники, величину яких в загальному випадку визначити неможливо.

Вказана невизначеність може бути усунена шляхом штучного зміщення початкового моменту реєстрації десорбції, що дозволяє виконувати розрахунки, вважаючи $t=0$. В цьому випадку експоненти в (4) відсутні, і обчислення спрощуються.

Розглянемо конкретний приклад десорбції газу в накопичувальну посудину (NP) відомого об'єму, коли рееструються часові зміни тиску газу P_{NP} в посудині.

На рис. 1 показані типові криві десорбції метану з вугілля в гранулах великого R і малого r розміру. Результати отримані для зразків вугілля рівної маси після їх попереднього насичення в камері з однаковим тиском метану.

Видно, що кількість газу, що виділилася з дрібних гранул вугілля, виявляється дещо меншою, ніж з гранул більших. Це пов'язано з тим, що реестрації десорбції завжди передуює скидання тиску газу з вільного об'єму камери насичення.

Паралельно з цим процесом, що займає декілька десятків секунд, відбувається також вихід метану з вугілля. Оскільки швидкість витікання газу з дріб-

них гранул вища, то до початку реестрації десорбції в них залишається менше метану, ніж у більших гранулах.

Видно, що, якщо частково видалити початковий відрізок кривої десорбції для великих гранул, ми дістаємо можливість порівнювати параметри кінетики десорбції для двох фракцій вугілля, знаючи наперед, що в початковий момент часу вони містили рівну кількість метану.

Порівняння характерних часів τ_{dec} і потоків $I(t)$ необхідно проводити за умови, що вміст метану Q в обох зразках вугілля однаковий. На рис. 2 показані точки (+) на кривих десорбції, в яких зміст метану в різних фракціях вугілля однаковий.

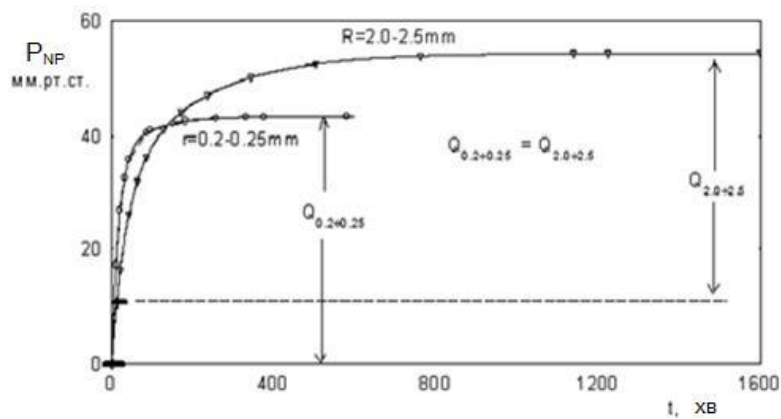


Рисунок 1 – Швидкість зміни тиску в накопичувальній посудині при десорбції метану з вугілля

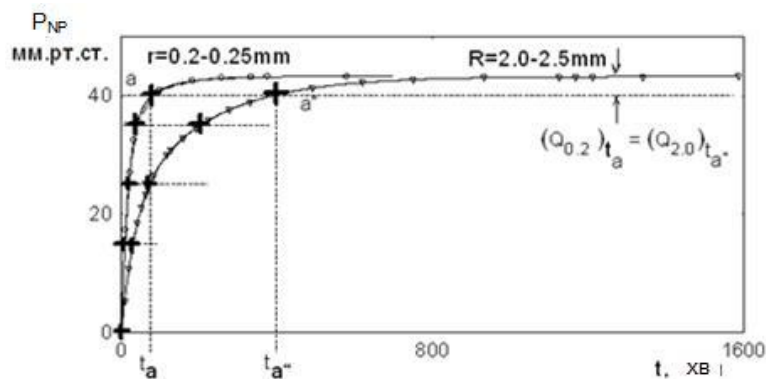


Рисунок 2 – Зміна тиску в накопичувальній посудині після приведення кривих десорбції до однакового початкового вмісту метану у вугіллі

Оскільки потік газу з вугілля пропорційний швидкості зміни тиску в накопичувальній посудині, то справедлива рівність:

$$\frac{I_r(t)}{I_R(t)} = \left[\frac{\partial N_{NP}(t)/\partial t}{\partial N_{NPR}(t)/\partial t} \right]$$

Останнім кроком в рішенні задачі має бути визначення величини потоку газу в точці $t=0$ для кож-

ної кривої. Це можна зробити графічним шляхом, або за допомогою комп'ютерної програми EasyPlot (Erw32), знайшовши похідну за часом для інтерполяційної функції, що описує хід десорбції. Результат останньої операції представлений на мал.3.

За умови однакового вмісту метану в рівних по масі двох фракціях вугілля рішення рівняння (3) дає для складових виразу (2) наступні формули:

$$\tau_{fr}(t)[1+U] = \frac{\tau_{decR}(t) - \tau_{dec}(t)}{W-1},$$

$$\tau_{fR}(t)[1+U] = \frac{W(\tau_{decR}(t) - \tau_{dec}(t))}{W-1},$$

$$\tau_d(t) = \frac{W\tau_{dec}(t) - \tau_{decR}(t)}{W-1},$$

де

$$W = \frac{R}{r} \sqrt{\frac{\partial P_{NPr}(t)}{\partial P_{NPR}(t)}}.$$

Отримані таким шляхом чисельні оцінки параметрів відповідають їх значенням в точках(+) на кривих десорбції. Як видно з рис. 3, подібні розрахунки можна виконати на будь-якій стадії десорбції. В

якості ілюстрації на рис. 4 приведені результати розрахунку характерного часу дифузії τ_d при різному вмісті метану у вугіллі. Для розрахунків використовувалося наближення, в якому хід зміни тиску в накопичувальній посудині при десорбції метану з вугілля описується інтерполяційною функцією виду:

$$P_{NP}(t) = P_{NP1} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{dec1}}\right) \right) + P_{NP2} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{dec2}}\right) \right). \quad (5)$$

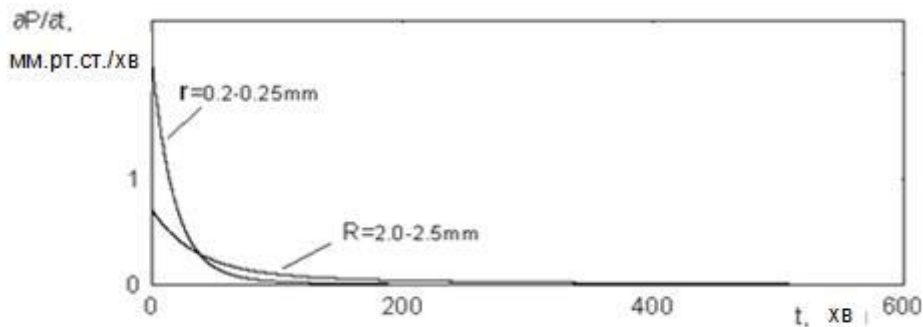


Рисунок 3 – Швидкість зміни тиску в накопичувальній посудині при десорбції метану з вугілля

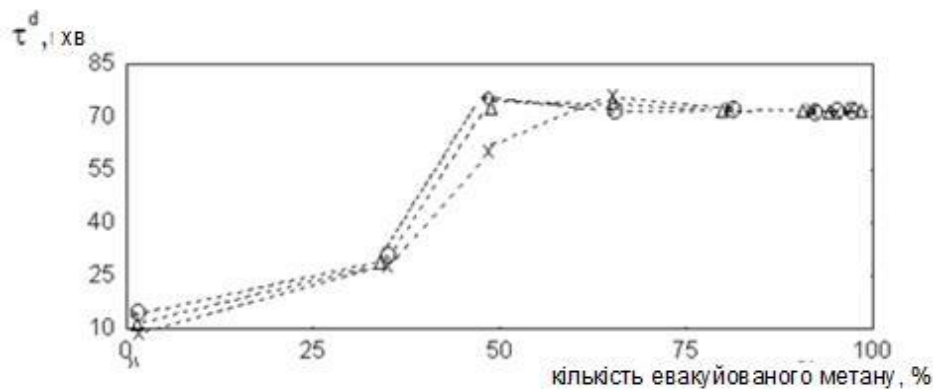


Рисунок 4 – Зміна характерного часу дифузії τ_d в ході десорбції метану

Досвід показує [8], що наближення суми двох експоненціальних функцій задовільно описує хід десорбції газу. Параметри τ_{dec1} і τ_{dec2} мають розмірність часу і розрізняються за величиною майже на порядок. Тому вказане наближення можна представити, як суперпозицію «швидкого» і «повільного» процесів виходу метану з вугілля, а параметри P_{NP1} і P_{NP2} відбивають максимальний тиск газу в накопичувальній посудині, який забезпечує кожного з цих процесів.

Значення τ_d , відмічені символом (o), отримані на основі даних про хід десорбції з вугілля в гранулах 0,2÷0,25мм і 2,0÷2,5мм, символом (x) - в гранулах 2,0÷2,5мм і 9,0÷10,0мм, а символом (Δ) - в гранулах 0,2÷0,25мм і 9,0÷10,0мм. Видно, що на початковій і середній ділянці десорбції значення τ_d , розраховані

для цих пар зразків, розрізняються. Аналіз показує, що це обумовлено вибором виду інтерполяційної функції, яка недостатньо точно описує хід десорбції на цих ділянках. Це особливо помітно в місцях «зшивання» двох її складових. Частково усунути цей недолік можна, збільшуючи число складових функцій (5). Найцікавішою і кориснішою виявляється завершальна фаза десорбції, де, як видно з рис. 4, величина характерного часу дифузії не залежить від вибору розміру фракцій вугілля кожної пари зразків.

Як показує розрахунок, використання даних про десорбцію з вугілля дає значення τ_d рівні 71,15хв, 70,67хв і 71,19хв для трьох вказаних вище пар зразків. Малий розкид розрахункових значень τ_d пов'язаний з тим, що хід десорбції, в її завершальній фазі, можна інтерполювати однією експоненціальною

функцією, яка є, в даному випадку, другою - "повільною" - складову функції (5). Величина $\tau_d = (r_{mc})^2 / D_d$ у цій фазі залежить (окрім коефіцієнта дифузії D_d) від середнього розміру r_{mc} найбільш великих мікроблоків вугілля (дифузійний потік газу з дрібних мікроблоків інтенсивніший і до цього моменту вони вже вільні від метану). Таким чином, можна констатувати, що характер і величина механічних навантажень, від яким знаходиться вугілля в процесі його подрібнення до необхідної фракції, не робить істотного впливу на середній розмір мікроблоків вугілля. З іншого боку, як відзначалося в роботі [8], розмір мікроблоків може змінитися (зменшитися) в умовах дії на вугілля деяких видів напруги. Отже, величина τ_d у завершальній фазі десорбції метану може служити для цієї марки вугілля індикатором міри безповоротних змін його структури. Ці зміни можуть бути наслідком дії деяких видів руйнівної напруги в гірському масиві і визначати мінімальний час виходу метану.

Малий розкид (менш 1 %) значень характерного часу дифузії в завершальній стадії десорбції служить доказом високої міри достовірності результатів розрахунку τ_d за описаною вище методикою. Така мала похибка у визначенні τ_d пов'язана з малою похибкою (менш 1 %) вимірів тиску в накопичувальній посудині.

Як легко бачити, при розрахунку не використовуються інші параметри, що вимагають незалежних експериментальних оцінок, - проникність вугілля, значення коефіцієнтів дифузії або фільтрація, відкрита або закрыта пористість і тому подібне. Цей

фактор не лише забезпечує малу помилку при визначенні τ_d , але і робить метод розрахунку простим і зручним в практичному використанні. Відмітимо на закінчення, що викладений метод найбільш ефективний, коли інтерполяційна функція складена тільки з експонент, як в (5).

Використовуючи експериментальні дані про величини τ_{decNP} для гранул великого R і малого r розміру, були отримані чисельні значення доданків виразу (2) для вкопного вугілля різної міри метаморфізму. Розрахунки засновані на оригінальних дослідженнях даних про кінетику десорбції метану з вугілля згаданих вище марок - Д, Ж, Т₁, Т₂ і А.

У табл.1 представлені результати розрахунку параметрів транспорту метану у вугіллі різної міри метаморфізму. У вугіллі низької метаморфізації час емісії метану визначається, в основному, часом дифузійного процесу. Великий час τ_d вказує на дифузю молекул газу в щільній речовині вугілля.

У антрациті і вугіллі «Т», навпаки, дифузія відбувається порівняно «легко» і швидко, а основний час виходу метану з вугілля обумовлений часом руху газу у фільтраційних каналах.

У останньому рядку табл. 1 вказані величини не «ефективних», а «чистих» коефіцієнтів дифузії D_d , які вільні від домішки фільтраційних ефектів, супутніх десорбції з вугілля. Видно, що параметр D_d змінюється для вугілля метаморфічного ряду: зростає при переході від вугілля марки «Д» до антрациту. Діапазон його зміни такий, що дозволяє робити певні висновки відносно виду дифузії з блоків.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнтів дифузії, фільтраційних і дифузійних складових характерного часу в завершальній стадії десорбції метану з кам'яного вугілля різних марок

Параметр	Д	Ж	Т ₁ (перем'ятий)	Т ₂	А
$\tau_{dec0,2}$, МИН	2340	1077	81	166	52,9
$\tau_{dec2,0}$, МИН	2930	2033	201	2000	1555
$(1+U)\tau_{f0,2}$, МИН	58	75,2	6	54,6	28,4
$(1+U)\tau_{f2,0}$, МИН	648	1031	126	1888	1530
$(1+U)\tau_{f2,0}/(1+U)\tau_{f0,2}$	11,2	13,7	21	34,6	53,9
τ_d , МИН	2282	1002	75	111,4	24,5
D_d , М ² /с	$7,3 \cdot 10^{-14}$	$1,6 \cdot 10^{-13}$	$2,2 \cdot 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{-12}$	$6,8 \cdot 10^{-12}$

Так для вугілля марок «Д» і «Ж» це дифузія, в основному, твердотільна, пов'язана з рухом метану із закритих пор через тіло вугілля в мікропори і далі через фільтраційні канали на поверхню гранули.

У вугіллі з малим вмістом летких речовин і антрациті коефіцієнт дифузії на один-два порядку більше, що вказує на інший вид дифузії, – поверхневу дифузю в мікропорах.

Ці висновки підтверджують отримані раніше [10] результати, які базувалися на розрахунках ефективних коефіцієнтів дифузії.

Цікава інформація виходить з порівняння фільтраційних параметрів $(1+U)\tau_{f2,0}$ і $(1+U)\tau_{f0,2}$ при десорбції метану з вугілля у великих і дрібних гранулах. З табл. 1 видно, що їх співвідношення відмінне від величини – 100, що передбачається теорією, і збі-

льшується від 11,2 до 53,9 при переході до вугілля високої метаморфізації і антрациту. Цей результат є наслідком масштабного ефекту в десорбції з вугілля, природа якого була описана в роботі [11].

Оскільки розмір блоків невідомий, при оцінці коефіцієнта дифузії $D_d = (r_{bl})^2 / \tau_d$ приймалося, що максимальний розмір блоків дорівнює мінімальному розміру гранул - 0,2мм.

Фракція вугілля 2,0-2,5 мм може містити деяку частину гранул з великими тріщинами, що для кінетики руху газу рівносильно зменшенню середнього розміру гранул. Так, якщо, наприклад, гранула вугілля з діаметром 2,0 мм має дві відносно великі тріщини, то довжина шляху фільтрації газу зменшується майже в 4 рази. В цьому випадку реальна величина $(R/r)^2$ може бути на порядок менше, чим 100.

Якщо ж відкрита пустотність слабо залежить від розміру шматка вугілля (як в антрацитах), то масштабний ефект малий і відношення фільтраційних параметрів $(1+U)\tau_{f,0}$ і $(1+U)\tau_{f,0,2}$ при десорбції велике.

ВИСНОВКИ. У вугіллі низької метаморфізації час емісії метану визначається, в основному, часом дифузійного процесу. У вугіллі високої метаморфізації основний час виходу метану з вугілля обумовлений часом руху газу у фільтраційних каналах. Коефіцієнт дифузії змінюється D_d для вугілля метаморфічного ряду: зростає при переході від вугілля марки Д до антрациту. Виявлені ознаки масштабного ефекту в десорбції, який залежить від міри метаморфізації вугілля.

ЛІТЕРАТУРА

1. Звягильский Е.Л., Бокий Б.В., Назимко В.В. Исследование процесса перераспределения метана вокруг движущегося очистного забоя / Норд-Пресс: Донецк, 2005.
2. Alexeev A. D., Vasilenko T. A., Gumennik K. V., Kalugina N. A., Feldman E. P. Diffusion-filtration model of methane escape from a coal seam. *Technical Physics*. 2007. Vol. 52, № 4. P. 456–465.
3. Fel'dman E. P., Vasilenko T. A., Kalugina N. A. Physical kinetics of coal-methane system: Mass transfer, pre-outburst events. *Journal of Mining Science*. 2014. Vol. 50, № 3. P. 448–464.
4. Алексеев А. Д., Фельдман Э. П., Стариков Г. П., Калугина Н. А., Кольчик И. Е. Прогноз времени образования опасных концентраций метана в очистных забоях. *Уголь Украины*. 2010. № 7. С. 29–32.
5. Fel'Dman E. P., Kirik, G. V. Stadnik, A. D. Spozhakina, A. I., Kalugina N. A. Methane accumulation in non-ventilated blind coal roadways. *Journal of Mining Science*. 2011. Vol. 47, № 1. P. 20.
6. Feldman, E., Kalugina, N., & Meln'ik, T. Role of unloading and filtration of gas in the development of main cracks in coal seams. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2017. (58), No. 1, pp. 155–164.
7. Алексеев А. Д., Васильковский В. А., Калугина Н. А. Кинетика и механизмы десорбции метана из угля. *Физико-технические проблемы горного производства*. Донецк, 2005, вып.8, С. 1–21.
8. Рева В. Н., Ульянова Е. В., Васильковский В. А. Влияние вида напряженного состояния на сорбционные свойства углей при их разрушении в условиях объемного неравнокомпонентного сжатия. *Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць. Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С.Полякова НАН України*. Дніпропетровськ, 2006, Вип. 67.
9. Васильковский В. А., Калугина Н. А., Молчанов А. Н. Фазовые состояния и механизмы десорбции метана из угля. *Физико-технические проблемы горного производства*. Донецк, 2006, Вып. 9, С. 62–70.
10. Васильковский В. А., Минеев С. П. Распределение и механизмы движения метана в блоках угля, *Физико-технические проблемы горного производства*. Донецк, 2017. Вып.19. С. 19–33.
11. Васильковский В. А., Пономаренко Д. А., Масштабный эффект в десорбции метана из каменного угля. *Сборник научных трудов УкрНИИМ НАН Украины*. Донецк, 2013. Вып. 13(ч. 1), С. 75–84.

DETERMINATION OF PARAMETERS OF METHANE TRANSPORT IN FOSSIL COAL AT DESORPTION

V. Vasilkovskiy, O. Chesnokova

Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine
vul. Simferopolska, 2a, Dnipro, 49600, Ukraine. E-mail: chesnokova0507@gmail.com.

Purpose. To develop physically sound method of determination of characteristic methane diffusion and filtration times at desorption from the fossil coals. **Methodology.** Fluid mechanics methods are used for description of mass transfer process combined with the sorptographic experiments for the determination of methane desorption from coal. Experimental data are used, which were obtained from conducted experiments on saturation of various grain-size coal samples with methane in the high-pressure chamber with the further recording of its release to the known volume container. **Results.** Based on the previously derived analytical expression for the characteristic time of desorption at its final stage, method is developed of separate determination of characteristic filtration and diffusion times. It is found that time of methane release from the D and G grade coals is mainly determined by the diffusion process. This suggests diffusion of gas molecules in the dense coal matter. On the contrary, diffusion in anthracite is relatively fast, and principal time of methane release from coal is determined by time of gas migration through the filtration channels. **Originality.** Information is obtained about the values of diffusion coefficients being free of additional filtration effects accompanying desorption from coals. It is found that coefficient of diffusion increases with the coal metamorphization degree increase. Coefficient of diffusion in coals with low volatile-matter content and anthracite increases by up to two orders, which may be due to addition of surface diffusion in micropores and transient pores. The scale effect variation is found for desorption in the metamorphic coal series. **Practical value** consists in the separate determination of diffusion and filtration parameters of methane transport in the fossil coal at desorption, which is used to maintain the comparative characteristics of methane transport parameters in the flat mine bed coal, in the geological faults zone coal and in the gas-dynamic zone coal. The coal desorption characteristics determination will allow improvement of the colliery operation safety estimation methods and assessment of possibility of coal mining as accessory energy producing material.

Key words: methane, coal, diffusion, filtration, desorption, metamorphization.

REFERENCES

1. Zvyagil'skiy, E. L., Boki'y, B. V., Nazimko, V. V. (2005), *Issledovanie protsessa pereraspredeleniya metana vokrug dvizhuschegosya ochistnogo zaboya*, [Investigation of the methane redistribution process around the moving bottom face], Nord- Press, Donetsk.
2. Alexeev, A. D., Vasilenko, T. A., Gumennik, K. V., Kalugina, N. A., Feldman, E. P. (2007), "Diffusion-filtration model of methane escape from a coal seam". *Technical Physics*. Vol. 52, № 4. P. 456–465.
3. Fel'dman, E. P., Vasilenko, T. A., Kalugina, N. A. (2014) "Physical kinetics of coal-methane system: Mass transfer, pre-outburst events", *Journal of Mining Science*. Vol. 50, № 3. P. 448–464.
4. Alekseev, A. D., Feldman, E. P., Starikov, G. P., Kalugina, N. A., Kolchik, I. E., (2010). "Prognoz vremeni obrazovaniya opasnykh kontsentratsiy metana v ochistnykh zaboyah", *Ugol Ukrainyi*. №7, pp. 29– 32.
5. Fel'dman, E. P., Kirik, G. V. Stadnik, A. D. Spozhakin, A. I., Kalugina, N. A. (2011). "Methane accumulation in non-ventilated blind coal roadways". *Journal of Mining Science*. Vol. 47, № 1. P. 20.
6. Fel'dman, E., Kalugina, N., Meln'ik, T. (2017). "Role of unloading and filtration of gas in the development of main cracks in coal seams". *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. (58), No.1, pp.155–164.
7. Alekseev, A. D., Vasilkovskiy, V. A., Kalugina, N. A. (2005). *Kinetika i mehanizmy desorbtzii metana iz uglya. Fiziko-tehnicheskie problemy gornogo proizvodstva*. [Kinetics and mechanisms of methane desorption from coal.], *Fiziko-tehnicheskie problemy gornogo proizvodstva*. Donetsk, №8, p.1-21.
8. Reva, V. N., Ulyanova, E. V., Vasilkovskiy, V. A., (2006), *Vliyanie vida napryazhennogo sostoyaniya na sorbtionnyye svoystva ugley pri ih razrushenii v usloviyakh ob'emnogo neravnokomponentnogo szhatiya*. [Influence of the stress state type on the sorption properties of coals upon their destruction under conditions of bulk non-uniform component compression], *Geotekhnichna mehanika: Mizhvid. zb. nauk. prats. In-t geotekhnichnoyi mehaniki im. M.S. Polyakova NAN Ukrainyi*. DnIpropetrovsk, №67.
9. Vasilkovskiy, V. A., Kalugina, N. A., Molchanov, A. N. (2006), *Fazovyye sostoyaniya i mehanizmy desorbtzii metana iz uglya*, [Phase states and mechanisms of methane desorption from coal]. *Fiziko-tehnicheskie problemy gor-nogo proizvodstva*, Donetsk, №.9, p.62-70.
10. Vasilkovskiy, V. A., Mineev, S. P. (2017), *Raspredelenie i meha-nizmy dvizheniya metana v blokah uglya*. [Distribution and mechanisms of methane movement in coal blocks], *Fiziko-tehnicheskie problemy gornogo proizvodstva*, №19, p.19-33.
11. Vasilkovskiy, V. A., Ponomarenko, D. A. (2013), *Masshtabnyiy effekt v desorb-tsii metana iz kamennogo uglya*. [The scale effect in the desorption of methane from coal], *Sb. nauch. tr., Ukr-NIMI NAN Ukrainyi*, Donetsk, №13 (I), p. 75-84.

Стаття надійшла 16.05.2018.