

РОЗРАХУНОК ЗМІНИ КОЕФІЦІЄНТА ФОЛЬМЕРІВСЬКОЇ ДИФУЗІЇ МЕТАНУ, ЩО ДЕСОРБУЄТЬСЯ З ВУГІЛЛЯ, У ПРИВИБІЙНІЙ ОБЛАСТІ ВУГІЛЬНОГО ПЛАСТА НА ВЕЛИКИХ ГЛИБИНАХ

¹Мінєєв С.П., ¹Прусова А.А., ²Янжула О.С., ²Сачко Р.М., ³Мінєєв О.С.

¹Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, ²ПАТ «Донецьксталь»,

³Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ФОЛЬМЕРОВСКОЙ ДИФФУЗИИ МЕТАНА, ДЕСОРБИРУЮЩЕГО ИЗ УГЛЯ, В ПРИЗАБОЙНОЙ ОБЛАСТИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ

¹Минеев С.П., ¹Прусова А.А., ²Янжула А.С., ²Сачко Р.Н., ³Минеев А.С.

¹Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова НАН України,

²ЧАО «Донецьксталь», ³Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

CALCULATION OF THE CHANGING COEFFICIENT OF THE FOLMEROV DIFFUSION OF METHANE DESORPED FROM COAL IN THE FACE AREA OF THE COAL LAYER AT GREAT DEPTHS

¹Minieiev S.P., ¹Prusova A.A., ²Yanzhula O.S., ²Sachko R.M., ³Minieiev O.S.

¹Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of NAS of Ukraine, ²Private Joint-Stock Company «Donetskstal», ³National Technical University "Dnipro Polytechnic"

Анотація. Розроблено алгоритм розрахунку коефіцієнта фольмерівської дифузії адсорбованого у вугіллі метану в привибійній зоні пласта до максимуму опорного тиску з урахуванням зміни фольмерівської пористості та величини простору цієї зони. Алгоритм заснований на використанні експоненціального закону компресії, що описує структурні зміни в області опорного тиску вугільного пласта. Це дозволило встановлювати діаметр фольмерівських пор в досліджуваній області в залежності від її напруженого стану. На основі цих даних та обрахування експоненціального характеру зміни пористості встановлено закономірність фольмерівської дифузії в привибійній області при фіксованій її довжині і первісній пористості вугілля. Використовуючи поетапний метод апроксимації рішення такої задачі для різних параметрів, результати досліджень узагальнені для існуючих діапазонів зміни фольмерівської пористості вугілля і розмірів привибійної області опорного тиску в умовах ведення гірничих робіт на великих глибинах. Встановлено апроксимаційну залежність, що дозволяє виконувати розрахунки коефіцієнту фольмерівської дифузії метану, який десорбується з вугільного пласта, при одночасній зміні двох параметрів - початкової пористості вугілля і відстані від вибою виробки до максимуму зони опорного тиску. Розрахунки показали, що при наближенні до максимуму опорного тиску, коефіцієнт фольмерівської дифузії метану у вугіллі знижується незначно. При цьому має місце досить сильна залежність коефіцієнта фольмерівської дифузії від діаметра фольмерівських пор в природному вугільному масиві. Так, наприклад, зі збільшенням цього діаметра в 2 рази - з 8 Å до 16 Å при відстані від вибою до точки максимуму опорного тиску 20 м коефіцієнт фольмерівської дифузії зростає в 1,5 рази. Тобто, фольмерівська дифузія найбільш інтенсивно протікає в порушених зонах вугільного пласта. Це може бути область максимуму опорного тиску, якщо там присутня область дезінтеграції, або в тій частині привибійної області, яка характеризується розвиненою системою тріщинуватості.

Ключові слова: десорбований метан, вугільний пласт, привибійна область, фольмерівські пори, коефіцієнт фольмерівської дифузії.

Вступ. Вугілля, як відомо [1, 2], є тріщинувато-пористим середовищем, що насичене метаном, пов'язаним з вугіллям міжмолекулярними силами. Кінетика масопереносу метану у вугіллі досить складна через різноманітність його

ієрархічної структури. Тому газовіддача вугільного масиву визначається різними типами дифузії: твердотільної, фольмерівської, кнудсенівської і вільної [3]. В даний час найбільший інтерес при розробці ефективних і безпечних технологій ведення вугледобувних робіт представляють типи дифузії, які відбуваються в умовах подолання найбільших сил міжфазної взаємодії метану з вугіллям. Це обумовлено тим, що зазначені процеси відбуваються при досягненні певних енергій активації дифузії метану [1, 4] і тому, в деяких умовах, можуть проявлятися досить несподівано при його вивільненні з вугільного масиву. Інформація про такі фізичні процеси дуже важлива, як при встановленні безпечних умов ведення гірничих робіт, так і для розробки ефективних технологій з видобутку метану [5-7]. До таких типів дифузії, що визначають описані вище процеси, відносяться твердотільна і фольмерівська дифузії. У першому випадку сорбований метан дифундує із закритих мікропор в твердий скелет [1]. А потім, шляхом твердотільної дифузії надходить у відкриті фольмерівські пори [8]. Після цього газ дифундує по фольмерівським порам до виходу в макропори і тріщини. Зазначені дифузії взаємопов'язані. При цьому, в даний час, більш вивченою є твердотільна дифузія [1, 4] в порівнянні з фольмерівською. У зв'язку з цим, в цій роботі поставлена мета: дослідити зміну коефіцієнта фольмерівської дифузії метану, що десорбується в привибійній зоні вугільного пласта, до максимуму опорного тиску при веденні гірничих робіт.

Методика. Відомо [8], що міграція метану у відкритих мікро- і мезопорах підпорядковується фольмерівській дифузії. Вона описується наступним коефіцієнтом дифузії [9]:

$$D_{\phi} = D_{0\phi} \times \sqrt{T} \exp\left(\frac{Q - E_{af}}{R_g T}\right), \quad (1)$$

де D_{ϕ} – коефіцієнт фольмерівської дифузії, м²/с; $D_{0\phi}$ – предекспоненціальний множник, м²/(с·°K); Q – енергія адсорбції, Дж /моль; R_g – газова постійна, Дж/(моль·°K); E_{af} – енергія активації фольмерівської дифузії, Дж / моль; T – температура, °K.

Параметри Q і E_{af} , що входять в формулу (1), визначаються діаметром відкритих пор, в яких знаходяться молекули метану в адсорбованому стані. Для непорушеного вугільного масиву і діаметрів мікропор 9, 10, 12 Å параметри у формулі (1) встановлені в роботі [10]. Їх чисельні значення представлені в таблиці 1.

На відміну від закритих мікропор, фольмерівські пори є стискувані. У межах зміни напруженого стану поблизу вибою виробки до максимуму опорного тиску зміна пористості зі збільшенням навантаження, в загальному вигляді, описується наступним виразом [11]:

$$\varepsilon_i = \varepsilon'_{iH} \exp(-a_2(\sigma_y - \gamma H)). \quad (2)$$

де $\varepsilon_i, \varepsilon'_{\gamma H}$ - пористість вугілля, відповідно, в розвантаженому та нерозвантаженому масиві; a_2 - коефіцієнт декомпресії, відповідний області навантаження, 1 / МПа; σ_y - нормальне напруження на даній ділянці навантаження, МПа; γ - об'ємна вага порід, Н/м³; H - глибина проведення виробки, м.

Таблиця 1 - Параметри фольмерівської дифузії метану у вугіллі для деяких пор [10]

Діаметр пор, Å	$D_{0\phi}$, м ² /(с·°K)	Q , кДж/моль	E_{af} , кДж/моль
12	$5,75 \cdot 10^{-11}$	7,8	6,2
10	$4,44 \cdot 10^{-11}$	8,5	6,3
9	$3,21 \cdot 10^{-11}$	9,1	6,5

Формула (2) дозволяє визначити величину зміни діаметра пор в міру зміни напруження непружної області опорного тиску в такий спосіб. Будемо виходити з припущення, що фольмерівські пори циліндричні та орієнтовані осями циліндрів уздовж площини нашарування. Тоді, виходячи з відомої формули для об'єму циліндра $V = \pi h d^2 / 4$, можна записати:

$$d_{\phi} = \sqrt{\frac{4\varepsilon_i}{\pi h}}, \quad (3)$$

де h - середня довжина фольмерівських пор.

Пористість поза дією зони опорного тиску дорівнює [11]:

$$\varepsilon'_{\gamma H} = \pi h d_{\phi 0}^2 / 4, \quad (4)$$

де $d_{\phi 0}$ - діаметр фольмерівської пори в непорушеному вугільному масиві.

Отримавши з формули (4) πh і підставивши її в (3), отримано наступне співвідношення для зміни діаметра фольмерівської пори у привибійній зоні опорного тиску:

$$d_{\phi} = d_{\phi 0} \sqrt{\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon'_{\gamma H}}}. \quad (5)$$

Що стосується встановлення температури вугільного пласта у формулі (1), то відповідно до роботи [12] температура на великих глибинах близько 1000 м дорівнює $T_n = 307,9^{\circ}\text{K}$. Причому в області поблизу вибою у вугільному пласті має місце зниження температури, зумовлене десорбцією метану. Її середня величина для розглянутих глибин становить, приблизно, $T_c = 2,09^{\circ}\text{K}$ [13]. Тоді загальна температура пласта дорівнює:

$$T = T_n - T_c = 305,8 \text{ }^\circ\text{K}. \quad (6)$$

Враховуючи експоненціальний характер зміни пористості в області опорного тиску (2), для встановлення залежності коефіцієнта фольмерівської дифузії (1) от діаметра фольмерівських пор його параметри можна апроксимувати функціями $D_{0\phi}(d_\phi)$, $Q(d_\phi)$ и $E_{af}(d_\phi)$ наступного виду:

$$D_{0\phi}(d_\phi) = D_D + A_D \exp(-d_\phi/t_D); \quad (7)$$

$$Q(d_\phi) = D_Q + A_Q \exp(-d_\phi/t_Q); \quad (8)$$

$$E_{af}(d_\phi) = D_E + A_E \exp(-d_\phi/t_E), \quad (9)$$

де перша складова в (7)- (9), встановлює значення параметра при діаметрі пори, яка прагне до безконечності; A_i –характеризує амплітуду зміни параметра; t_i - характеризує швидкість зміни параметра зі зміною діаметра пори. Чим параметр t_i більший, тим повільніше відповідний параметр апроксимації наближається до свого граничного значення.

Дані таблиці 1 дозволяють встановлювати параметри апроксимації в співвідношеннях (7) - (9). Визначивши їх і підставляючи в формули (1), з урахуванням (5), (6) можна отримати співвідношення (1) для D_ϕ , яке залежне тільки від пористості. Аналогічним чином можна отримати відповідні залежності від відстані вибою до максимуму опорного тиску.

Результати. Відповідно до вище викладеної методики, в результаті апроксимації параметрів в формулі (1) співвідношеннями (7) –(9) було отримано наступний вираз для визначення $D_\phi(d_\phi)$ з достовірністю апроксимації $R^2 = 0,95$:

$$D_\phi(d_\phi) = (6,76 * 10^{-11} - 1,57 * 10^{-9} * \exp\left(-\frac{d_\phi}{2,38}\right)) * \exp\left(\frac{7,44 + 148,39 * \exp(-d_\phi/2,0) - 6,18 + 26,35 * \exp(-d_\phi/0,99)}{R_e T}\right). \quad (10)$$

Формула (10) дозволяє визначити коефіцієнт фольмерівської дифузії метану при різних діаметрах фольмерівських пор. Результати проведеного розрахунку зміни коефіцієнта фольмерівської дифузії метану за співвідношенням (10) з урахуванням (5) і (6) у вугільній порі з початковим діаметром 12\AA в області опорного тиску, яка типова для великих глибин [14] представлені на рисунку 1. При цьому довжина області висхідної гілки епюри опорного тиску дорівнює $l = 10$ м.

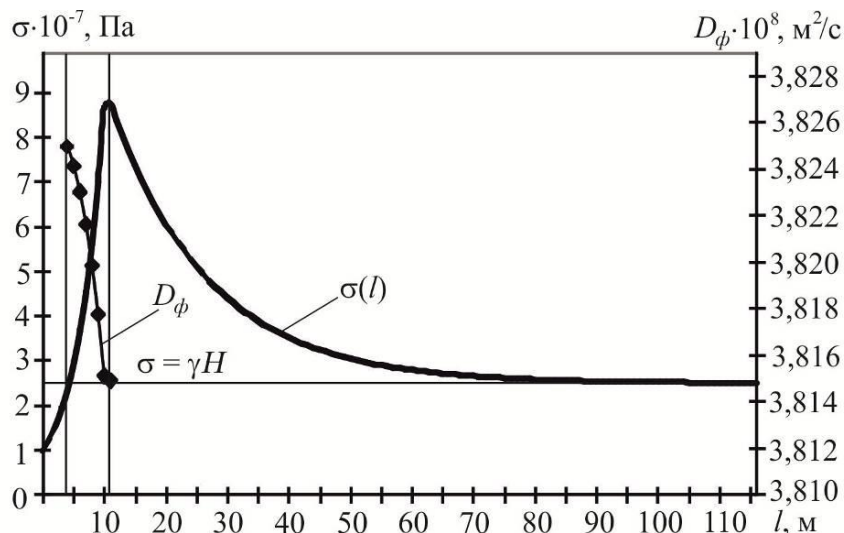


Рисунок 1 - Зміна коефіцієнта фольмерівської дифузії метану у вугільній порі з початковим діаметром 12\AA - $D_\phi(l)$ в області висхідної гілки епюри опорного тиску - $\sigma(l)$

Як видно з рисунка 1, коефіцієнт фольмерівської дифузії метану у вугіллі зменшується із наближенням до максимуму опорного тиску. При цьому зміна коефіцієнта дифузії є досить невеликою. Вона становить всього 0,25 % від значення коефіцієнта дифузії в області, де величина опорного тиску дорівнює γH . Це, мабуть, пов'язано зі слабким стисненням фольмерівських пор. Аналогічно змінюється коефіцієнт дифузії для інших початкових діаметрів фольмерівських пор (рис. 2).

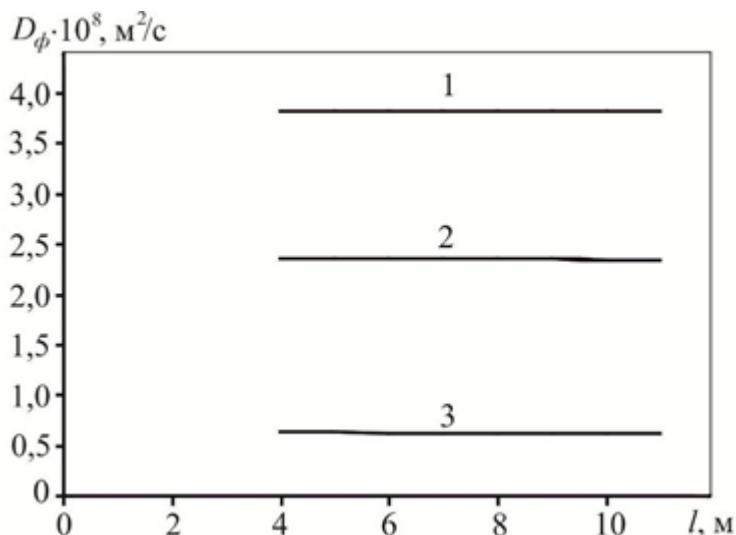


Рисунок 2 - Зміна коефіцієнта фольмерівської дифузії в області висхідної гілки епюри опорного тиску для різних діаметрів початкових фольмерівських пор: 1 - 12\AA ; 2- 10\AA ; 3- 8\AA

Як показує характер зміни коефіцієнтів фольмерівської дифузії метану у вугіллі, представлених на рисунку 2, його залежність від розміру зони опорного тиску від вибою до його максимуму – a , можна апроксимувати лінійним законом:

$$D_\phi = Ba + A. \quad (11)$$

Результати апроксимації констант A і B у співвідношенні (11) для різних діаметрів фольмерівських пор представлені в таблиці 2 при достовірності апроксимації $R2 = 0,975$.

Таблиця 2 - Параметри апроксимації констант коефіцієнта фольмерівської дифузії від відстані вибою метану виробки до максимуму опорного тиску

Діаметр пор, Å	Параметр апроксимації	
	$A, \text{ м}^2 / \text{ с}$	$B, \text{ м/с}$
8	$6,42 \cdot 10^{-09}$	$-3,33 \cdot 10^{-11}$
10	$2,37 \cdot 10^{-08}$	$-2,23 \cdot 10^{-11}$
12	$3,83 \cdot 10^{-08}$	$-1,38 \cdot 10^{-11}$
14	$4,57 \cdot 10^{-08}$	$-8,10 \cdot 10^{-12}$
16	$5,16 \cdot 10^{-08}$	$-3,62 \cdot 10^{-12}$

Залежності параметрів A і B від діаметра пор, які приведені в таблиці 2, наведені на рисунку 3.

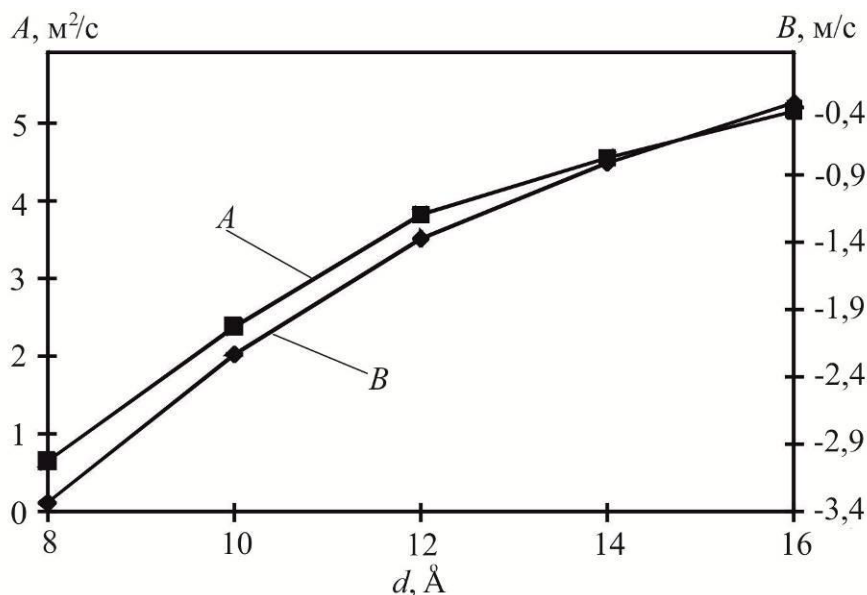


Рисунок 3 - Залежність параметрів апроксимації A і B від діаметра пор в співвідношенні (11)

Залежності на рисунку 3 апроксимуються експоненціальними функціями, що подібні функціям (7) - (9). Коефіцієнт достовірності апроксимації $R2$ склав не менше 0,95. Результати апроксимації параметрів A і B експоненціальними функціями підставлені у вираз (11). В результаті отримано наступний вираз для коефіцієнта фольмерівської дифузії метану у вугільному пласті:

$$D_{\phi}(d_{\phi}) = (-8,29 * 10^{-12} - 1,45 * 10^{-10} \exp(-d_{\phi} / 6,39))a + \\ + 5,76 * 10^{-8} - 3,32 * 10^{-7} \exp(-d_{\phi} / 4,29). \quad (12)$$

Формула (12) дозволяє оцінити зміну коефіцієнта фольмерівської дифузії

метану в мікропорах вугілля різного діаметру за умови розташування максимуму опорного тиску на відстані 10 м від вибою виробки. Аналогічним чином проведено розрахунки коефіцієнта фольмерівської дифузії метану у вугіллі для відстаней 20 м і 30 м. Їх апроксимацію проведено експоненціальною функцією, аналогічної функціям (7) - (9), у вигляді:

$$y_1 = y_{01} + A_{e1} \exp(-a/t_1). \quad (13)$$

В результаті з достовірністю не менше 0,95 отримано:

- для параметра А функції (11) -

$$y_{0A} = 5,14 \cdot 10^{-8} + 1,95 \cdot 10^{-9} \exp(a/8,65); \quad (14)$$

$$A_{eA} = -1,99 \cdot 10^{-7} - 3,60 \cdot 10^{-7} \exp(-a/10,03); \quad (15)$$

$$t_A = 3,51 + 0,25 \exp(-a/8,66); \quad (16)$$

- для параметра В функцій (11) -

$$y_{0B} = -2,73 \cdot 10^{-12} - 2,79 \cdot 10^{-14} \exp(a/5,67); \quad (17)$$

$$A_{eB} = -6,05 \cdot 10^{-11} - 1,32 \cdot 10^{-11} \exp(a/16,15); \quad (18)$$

$$t_B = 2,39 + 856,65 \exp(-a/1,86). \quad (19)$$

З урахуванням того, що коефіцієнти А і В залежать також від d_ϕ , за формулою, яка аналогічна (13) остаточно встановлено:

$$A = 5,14 \cdot 10^{-8} + 1,95 \cdot 10^{-9} \exp(a/8,65) + \\ + (-1,99 \cdot 10^{-7} - 3,60 \cdot 10^{-7} \exp(-a/10,03)) * \\ * \exp(-d_\phi / (3,51 + 0,25 \exp(-a/8,66))). \quad (20)$$

$$B = -2,73 \cdot 10^{-12} - 2,79 \cdot 10^{-14} \exp\left(\frac{a}{5,67}\right) + \\ + \left(-6,05 \cdot 10^{-11} - 1,32 \cdot 10^{-11} \exp\left(\frac{a}{16,15}\right)\right) \cdot \exp\left(\frac{-d_\phi}{2,39 + 856,65 \exp(a/1,86)}\right). \quad (21)$$

Підставивши вирази (20) і (21) в (11), отримаємо шукану залежність коефіцієнта фольмерівської дифузії метану у вугіллі від діаметра фольмерівських мікропор - d_ϕ та відстані від вибою виробки до максимуму зони опорного тиску - a .

Висновки

1. Визначено функціональну апроксимаційну залежність зміни коефіцієнта фольмерівської дифузії метану, що десорбується з вугільного пласта, від діаметра фольмерівських мікропор - d_{ϕ} та відстані від вибою виробки до максимуму зони опорного тиску – a , що визначається виразами (11), (20) і (21).

2. Встановлено, що в міру наближення до максимуму опорного тиску, розташованого на відстані 10 м від вибою, коефіцієнт фольмерівської дифузії метану у вугіллі знижується незначно.

3. Дослідження зміни коефіцієнта фольмерівської дифузії десорбованого метану показали досить сильну його залежність від діаметра фольмерівських пор в природному вугільному масиві. Так, наприклад, зі збільшенням цього діаметра в 2 рази - з 8 Å до 16 Å при відстані від вибою до максимуму опорного тиску 20 м коефіцієнт фольмерівської дифузії зростає в 1,5 рази. Тобто, фольмерівська дифузія найбільш інтенсивно протікає в порушених зонах вугільного пласта. Це може бути область максимуму опорного тиску, якщо там присутня область дезінтеграції, або в тій частині привибійної області, яка характеризується розвиненою системою тріщинуватості.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Минеев С.П., Прусова А.А., Корнилов М.Г. Активация десорбции метана в угольных пластах. Днепропетровск: Вебер. 2007. 252 с.
2. Минеев С.П. Свойства газонасыщенного угля. Днепропетровск: НГУ. 2008. 220 с.
3. Физико-химия газодинамических явлений в шахтах / В.В. Ходот, М.Ф. Яновская, Ю.С. Премислер и др. М.: Наука, 1973. 140 с.
4. Prusova A., Minieiev O., Ryzhova S. Simulation of the desorption process of methane adsorbed in a coal rock, taking into account intermolecular sorption interactions in the system "methane-coal". E3S Web of Conferences, International Conference Essays of Mining Science and Practice, 109. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900073>.
5. Оценка возможности импульсного выделения сорбированного метана из угольного пласта / С.П. Минеев, А.А. Прусова, А.А. Потапенко, В.Н. Кочерга // Уголь Украины. 2014. №10. С. 31-36.
6. Основные параметры прогноза импульсных метановыделений в зонах геологических нарушений / С.П. Минеев, В.Н. Кочерга, А.С. Янжула, А.А. Гулай // Уголь Украины. 2016. №3. С. 25-32.
7. Минеев С.П., Кочерга В.Н., Янжула А.С. Оценка импульсного метановыделения в зонах геологических нарушений при обрушении кровли // Уголь Украины. 2016. №1. С. 11- 18.
8. Эттигнер И.Л.. М.: Наука, 1975. 112 с.
9. Малышев Ю.Н. Трубецкой К.Н., Айруни А. Т. Фундаментально прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов. К.– М.: АГН. 2000. 519 с.
10. Коэффициенты фольмеровской диффузии метана в угольном пласте / С.П. Минеев, А.А. Прусова, М.Г. Корнилов, О.В. Витушко // Геотехническая механика, Днепропетровск: ИГТМ НАНУ. 2010. № 87. С. 157- 162.
11. Минеев С.П., Прусова А.А. Кинетика структурных изменений в зоне опорного давления напряженного газонасыщенного угольного пласта // ФТПРПИ. 1992. №2. С. 53- 60. <https://doi.org/10.1007/BF00710734>
12. Методика геофизических исследований скважин Донбасса / И.А. Гаркаленко, В.Ю. Зайченко, А.Ф. Михедько, Н. П. Развалов. Киев: Наукова Думка, 1971. 156 с.
13. Некоторые результаты натурных исследований температуры угольных пластов в зоне влияния горных выработок / Г.И. Фейт, Э.И. Гайко, С.М. Денисенко, В.М. Кайдан // Вопросы вентиляции и борьбы с газом и внезапными выбросами в угольных шахтах. М.: ИГД им. А.А. Скочинского. 1977. Вып. 157. С. 141-144.
14. Моделирование фильтрационного процесса в угольном пласте, вмещающем зону нарушенности, насыщенную свободным и сорбированным газом / С.П. Минеев, А.А. Прусова, В.Н. Сапегин и др. Геотехническая механика, Днепропетровск. 2016. №130 . С. 20- 42.

REFERENCES

1. Mineev, S.P., Prusova, A.A. and Kornilov, M.G. (2007), *Aktivatsiy desorbtsii metana v ugolnykh plastakh* [Methane desorption activation in coal seams], Weber Dnepropetrovsk, Ukraine
2. Mineev, S.P. (2008), *Svoistva gazonasyshchennogo uglya* [Properties of gas saturated coal], NSU Dnepropetrovsk, Ukraine.
3. Khodot, V.V., Yanovskaya, M.F., Premysler, Yu.S. et al. (1973), *Fiziko-khimiya gazodinamicheskikh yavlenii v shakhtakh* [Physical chemistry of gas-dynamic phenomena in mines], Nauka, Moscow, USSR.

4. Prusova, A., Minieiev, O. and Ryzhova, S. (2019), "Simulation of the desorption process of methane adsorbed in a coal rock, taking into account intermolecular sorption interactions in the system "methane-coal", *E3S Web of Conferences, International Conference Essays of Mining Science and Practice*, 109. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900073>
5. Mineev, S.P., Prusova, A.A., Potapenko, A.A. and Poker, V.N. (2014), "Assessment of the possibility of pulsed separation of sorbed methane from a coal seam", *Coal of Ukraine*, No. 10, pp. 31-36.
6. Mineev, S.P., Kocherga, V.N., Yanzhula, A.S. and Gulay A.A. (2016), "Basic parameters for forecasting pulsed methane emissions in zones of geological disturbances», *Coal of Ukraine*, No. 3, pp. 25-32.
7. Mineev, S.P., Kocherga, V.N. and Yanzhula, A.S. (2016), "Estimation of pulsed methane release in zones of geological disturbances during roof collapse", *Coal of Ukraine*, No. 1, pp. 11-18.
8. Ettigner, I.L. (1975), *Raspredezenie metana v porakh iskopaemykh uglei* [Distribution of methane in the pores of fossil coals], Nauka, Moscow, USSR.
9. Malyshev, Yu.N. Trubetskoy, K.N. and Airuni, A.T. (2000), *Fundamentalno-prikladnye metody resheniya problem metana ugolnykh plastov* [Fundamental applied methods for solving the problem of methane in coal seams] AGN, Moscow, Russia.
10. Mineev, S.P., Prusova, A.A., Kornilov, M.G. and Vitushko, O.V. (2010), "Folmer methane diffusion coefficients in coal seam", *Geo-Technical Mechanics*, № 87, pp. 157-162.
11. Mineev, S.P. and Prusova, A.A., (1992), "Kinetics of structural changes in the reference pressure zone of a stressed gas-saturated coal seam", *FTPRPI*, no. 2, pp. 53-60. <https://doi.org/10.1007/BF00710734>
12. Garkalenko, I.A., Zaichenko, V.Yu., Mikhedko, A.F. and Razvalov, N.P. (1971), *Metodika geofizicheskikh issledovaniy skvazhin Donbassa* [Technique of geophysical surveys of Donbass wells], Naukova Dumka, Kyiv, Ukraine.
13. Faith, G.I., Gaiko, E.I., Denisenko, S.M. and Kaidan, V.M. (1977), "Some results of field studies of the temperature of coal seams in the zone of influence of mine workings", *Issues of ventilation and control of gas and sudden emissions in coal mines*, vol.157, pp. 141-144.
14. Mineev, S.P., Prusova, A.A., Sapegin, V.N., Yanzhula, A.S. and Intestine M.A. (2016), "Modeling the filtration process in a coal seam containing a disturbed zone saturated with free and sorbed gas", *Geo-Technical Mechanics*, № 130, pp. 20-42.

Про авторів

Мінєєв Сергій Павлович, доктор технічних наук, професор, завідувач відділом керування динамічними проявами гірничого тиску, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, sergmineev@gmail.com.

Прусова Алла Андріївна, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник лабораторії структурних досліджень гірських порід, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, sergmineev@gmail.com.

Янжула Олексій Сергійович, кандидат технічних наук, директор з перспективного розвитку і інвестицій, Приватне акціонерне товариство "Донецьксталь", Покровськ, Україна, sergmineev@gmail.com

Сачко Роман Миколайович, магістр, головний інженер шахтоуправління "Покровське", Приватне акціонерне товариство "Донецьксталь", Покровськ, Україна, sergmineev@gmail.com

Мінєєв Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, sergmineev@gmail.com

About the authors

Minieiev Serhii Pavlovych, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of Department of Pressure Dynamics Control in Rocks, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, sergmineev@gmail.com

Prusova Alla Andriivna, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher in Laboratory of Structural Research of Rocks, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, sergmineev@gmail.com

Yanzhula Oleksii Serhiiovych, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Director of Perspective Development and Investments, PJSC "Donetskstal", Pokrovsk, Ukraine, sergmineev@gmail.com

Sachko Roman Mykolaiovych, Master of Sciences, Chief Engineer of Pokrovske Mine Management, PJSC "Donetskstal", Pokrovsk, Ukraine, sergmineev@gmail.com

Minieiev Olexsandr Serhiiovych, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor of National Technical University "Dnipro Polytechnic", Dnipro, Ukraine, sergmineev@gmail.com

Аннотация. Разработан алгоритм расчета коэффициента фольмеровской диффузии десорбированного в угле метана в призабойной зоне пласта до максимума опорного давления с учетом изменения фольмеровской пористости и величины протяженности этой зоны. Алгоритм основан на использовании экспоненциальных компрессионных зависимостей, описывающих структурные изменения в области опорного давления угольного пласта. Это позволило устанавливать диаметр фольмеровских пор в исследуемой области в зависимости от ее напряженного состояния. На основе этих данных и учета экспоненциального характера изменения пористости установлена закономерность фольмеровской диффузии в призабойной области при фиксированной ее длине и начальной пористости угля. Используя поэтапную аппроксимацию решения такой задачи для различных

параметров исследования обобщены для существующих диапазонов изменения фольмеровской пористости угля и размеров призабойной области опорного давления в условиях ведения горных работ на больших глубинах. Установлена функциональная аппроксимирующая зависимость, позволяющая выполнять расчеты коэффициента фольмеровской диффузии метана, десорбирующегося из угольного пласта, при одновременном варьировании двух параметров – начальной пористости угля и длины зоны опорного давления до ее максимума. Расчеты показали, что по мере приближения к максимуму опорного давления, расположенного на расстоянии до 10 м от забоя, коэффициент фольмеровской диффузии метана в угле снижается незначительно. При этом имеет место достаточно сильная его зависимость от диаметра фольмеровских пор в нетронутом угольном массиве. Так, например, с увеличением этого диаметра в 2 раза – с 8 А до 16 А при расстоянии забоя до максимума опорного давления 20 м коэффициент фольмеровской диффузии возрастает в 1,5 раза. То есть, фольмеровская диффузия десорбирующегося метана наиболее интенсивно протекает в нарушенных зонах угольного пласта. Это может быть область максимума опорного давления, если там присутствует область дезинтеграции, или в той части призабойной области, которая характеризуется развитой системой трещиноватости.

Ключевые слова: десорбированный метан, угольный пласт, призабойная область, фольмеровские поры, коэффициент фольмеровской диффузии.

Abstract. An algorithm for calculating the Volmer diffusion coefficient of methane adsorbed in coal in the bottomhole zone of the formation to the maximum reference pressure is developed with taking into account the change in the Folmer porosity and the size of the space of this zone. The algorithm is based on the using of the exponential law of compression, which describes the structural changes in the reference pressure of the coal seam. This allowed us to determine the diameter of the Folmer pores in the study area depending on its stress state. Based on these data and the calculation of the exponential nature of the change in porosity, the regularity of the Folmer diffusion in the bottomhole region at its fixed length and initial porosity of coal is established. By using a method of step-by-step approximating the solution of this problem for different parameters, the research results are generalized to the existing ranges of change in the Folmer porosity of coal and the size of the bottomhole region of reference pressure in mining conditions at great depths. The functional approximation dependence is established, which allows to perform calculations of the Volmer diffusion coefficient of methane desorbed from the coal layer, with simultaneous change of two parameters - initial porosity of coal and distance between the bottom to the maximum reference pressure zone. Calculations showed that when reference pressure approached its maximum at a distance of up to 10 m from the face the coefficient of Folmer diffusion of methane in coal decreased slightly. In this case, there is a strong dependence of the Volmer diffusion coefficient on the diameter of the Folmer pores in the virgin coal layer. For example, when this diameter increases twofold - from 8 A to 16 A at the distance of 20 m from the face to a maximum reference pressure, the coefficient of Folmer diffusion increases by 1.5 times. That is, Folmer's diffusion is the most intensive in the disturbed zones of the coal layer. This can be the area of maximum reference pressure, if there is a zone of disintegration, or in that part of the face zone, which is characterized by the developed system of fractures.

Key words: adsorbed methane, coal layer, face zone, Folmer pores, Folmer diffusion coefficient.

Стаття надійшла до редакції 04.12.2020