

ANALYSIS OF THE ROCK MASS STRUCTURAL FEATURES FORMED IN CONNECTION WITH METHANE FILTRATION

V. Cherednyk¹, N. Khoziaikina^{1}, D. Shashenko¹*

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

**Corresponding author: khoziaikina.n.v@nmu.one*

Abstract. The coal-rock mass is a three-phase formation of a layered joint-porous structure with a block structure. Joints and pores connected to each other represent a filtration space through which the gas is drained into the mine excavation. Man-caused intervention in the coal mass leads to a violation of its equilibrium state, including the gas phase. The free gas is directed towards the mined out space through the surface of the rock cleavage. The methane transfer in the coal mass is carried out in the filtration mode with simultaneous feeding of the filtration volume with methane. Methane is dissolved in blocks, that relatively evenly distributed over the degassed massif entire volume. Approaches to the determination of joint porosity are considered, taking into account the scale effect in the transition from a single crack permeability (microlevel) to the rock mass permeability (macrolevel). Different approaches to the determination of joint porosity are considered, on the basis of it the equation for determining the joint permeability of the rock mass is substantiated. Thus, increasing the joint openness of the reservoir rocks by single order increases the permeability of this volume by three orders of magnitude. Deformation, as a rock reaction to external stress change, occurs at a speed of sound in this rock. Approximately at the same rate in the rock the growth and opening of joint are appeared, which explains the significant changes in the gas exhalation dynamics when changing the stress-strain state of the rock mass.

Key words: coal-rock mass, gas-dynamic processes, cracks, joint, filtration.

АНАЛІЗ СТРУКТУРНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОРОДНОГО МАСИВУ, ЩО ПІДРОБЛЮЄТЬСЯ У ЗВ'ЯЗКУ З ФІЛЬТРАЦІЄЮ МЕТАНУ

В. Чередник¹, Н. Хозяйкіна^{1}, Д. Шашенко¹*

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

**Відповідальний автор: khoziaikina.n.v@nmu.one*

Анотація. Вуглепорідний масив являє собою трифазне утворення шаруватої тріщинувато-пористої структури з блочною будовою. Тріщини і пори, що сполучені між собою представляють простір фільтрації, за яким газ дренається в гірничі виробки. Техногенне втручання до вуглепородного масиву призводить до порушення його рівноважного стану, в тому числі по газовій фазі. Вільний газ спрямовується в бік виробленого простору через поверхні породних відслонень. Перенесення метану у вуглепородному масиві здійснюється в режимі фільтрації з одночасним підживленням фільтраційного обсягу метаном, який розчинений в блоках, відносно рівномірно розподіленого по всьому об'єму масиву, що дегазується. Розглянуто підходи до визначення тріщиної пористості з урахуванням масштабного ефекту при переході від проникності одиничної тріщини (мікрорівень) до проникності масиву (макрорівень). Розглянуті різні підходи до визначення тріщиної пористості, що дозволило обґрунтувати рівняння для визначення тріщиної проникності породного масиву. Отже, збільшення розкритості тріщин фільтраційного об'єму породи-колектора на один порядок збільшує проникність цього об'єму на три порядки. Деформування, як реакція гірської породи на зміну зовнішнього навантаження, протікає зі швидкістю, яка дорівнює швидкості звуку в даній породі. Приблизно з такою ж швидкістю в гірській породі відбувається зростання і розкриття тріщин, що пояснює суттєві зміни в динаміці газовиділення при зміні напружено-деформованого стану масиву.

Ключові слова: вуглепородний масив, газодинамічні процеси, тріщини, розкриття, фільтрація.

Вступ. У недоторканому стані вуглепородний масив являє собою трифазне утворення (тверде тіло – газ – вода) шаруватої тріщинувато-пористої структури і блочної будови. У межах кожного шару тріщини перевищують розміри зерен мінералів, мають тектонічну природу або утворені в процесі формування геологічних тіл. Тріщини в гірських породах розподіляються не хаотично, а за певними системами, що характеризуються орієнтуванням в просторі, розкриттям та їх густотою. Екзогенні тріщини, утворені в результаті зовнішніх впливів, розділені на три системи: продольні, які збігаються з основним напрямком складчастості, поперечні та діагональні.

У нафто- та газовидобувній галузі урахування впливу структури порід-колекторів на їх газопроникність здійснюють через такий їх параметр як пористість. Під пористістю розуміють загальний обсяг пустот, включаючи ультра, мікро- і макропори, тріщини природного і техногенного характеру. Тут необхідно зазначити, що використання самого терміну «пористість» передбачає наявність суцільного середовища. Уявлення суцільності умовні і вказують на нижню межу розмірів структурних елементів, за межами якої порожнечі і твердий скелет «довільно зливаються в поняття континуум» [1]. Застосування положень механіки суцільного середовища до гірських порід як матеріального середовища, де різниця фізичних констант для двох близьких її точок (часток) досить мала, є обґрунтованим [2, 3].

Методика. Тріщини і пори, що сполучені між собою представляють простір фільтрації, за яким газ дренується в гірничі виробки. В умовах недоторканого масиву параметри фільтрації стабільні, і в масивах 4-5 класів проникності темпи припливу метану в видобувні свердловини недостатні для його промислового видобутку. Інтенсифікація газопритоку виконується за рахунок техногенних впливів на породи гірського масиву, що містять газ, з метою збільшення пропускної здатності фільтруючого простору. Найбільш потужним з цих заходів є підрізок вуглепородного масиву очисними роботами. Реакція масиву на зазначені заходи проявляється у вигляді зміни його лінійних розмірів і форми, що тягне за собою зміни пропускної здатності пустот фільтраційного простору. В процесі формозміни тріщинувато-пориста структура породної частки зазнає різного роду зміни від стану, характерного для природного поля напружень, який не порушено проведенням очисних робіт, до стану, коли ця частка повністю дезінтегрована системами пересічних тріщин. Паралельно змінюються закономірності деформування цієї частки, включаючи пружне, непружне, а також формозміни сипучого середовища.

Основні газомісні породи Донбасу – вугілля і пісковики – мають розвинену систему пір в діапазоні до семи порядків величин [4, 5, 6]. Пористо-тріщинувата структура вугільної або породної частки включає в себе такі пори і тріщини, що мають газодинамічний зв'язок з відслоненою поверхнею (відкрита пористість) і не мають (закрита пористість). Порожнечі різних розмірів грають різну роль в газодинаміці порід-колекторів та впливають на газопроникність по-різному. Згідно з результатами досліджень [7], різні рідини і гази досить швидко проникають до вуглепородного масиву або, навпаки, залишають його тільки по пустотах, що являє собою відкриту пористість.

Техногенне втручання до вуглепородного масиву призводить до порушення його рівноважного стану, в тому числі по газовій фазі. При цьому кількісно і якісно змінюються параметри провідних каналів, змінюється проникність окремих областей і вуглепородного масиву в цілому. Вільний газ спрямовується в бік виробленого простору через поверхні породних відслонень, що ініціює процеси десорбції метану і його дифузії з блоків вугілля (породи) в провідні канали. Перенесення метану у вуглепородному масиві здійснюється в режимі фільтрації з одночасним підживленням фільтраційного обсягу метаном, який розчинений в блоках, відносно рівномірно розподіленого по всьому об'єму масиву, що

дегазується [8]. Питання газообміну між сорбційним і фільтраційним просторами в вуглепородних масивах детально розглянуті в роботах [1, 5, 6, 9, 10, 11-13], і встановлені на підставі зазначених досліджень закономірності є достатніми для адекватної оцінки параметрів газообміну.

В рамках проблем видобутку шахтного метану доцільно розмежувати тріщинно-поровий об'єм газомістких порід масиву на дві складові: фільтраційну і сорбційну. Сорбційний простір включає порожнечі з шириною розкриття, що не перевищує довжину вільного пробігу молекули метану, і відповідає за процес притоку метану, що десорбується, в фільтраційний простір газового колектора. Падіння тиску газу, зумовлене його дренаванням з масиву, збільшує довжину вільного пробігу. При цьому режим руху метану в деяких провідних каналах може втрачати ознаки фільтрації, і ці порожнечі починають виконувати функції, властиві сорбційному простору. У зв'язку з цим провести чітку межу, що розділяє фільтраційний і сорбційний простір за розмірами порожнин, не є можливим. В роботі [5] зазначено, що межа поділу проходить в області перехідних пір ($10^{-7} - 10^{-8}$ м), в більш ранніх дослідженнях в якості такої межі вказані порожнечі з шириною розкриття близько $A500$ [1].

Обсяг пустот сорбційного простору основних газових порід Донецького басейну практично не залежить від їх напружено-деформованого стану. Про це свідчать результати експериментальних досліджень з навантаження зразків вугілля до величин, що відповідають глибинам до 1500 м [1]. Аналогічні результати стосовно безпечних та небезпечних за викидами пісковиків відображені в [5, 6]. Випробування зразків гірських порід на установках одновісного стиску також свідчать про незначне зменшення об'єму деформованих зразків на ранньому етапі пружної стадії деформування, коли провідні тріщини закриті [14], а проникність досягає своїх мінімальних значень [1]. При натурних дослідженнях дані умови деформування спостерігаються на ділянках пластів (шарів) гірських порід, що потрапляють в зону опорного тиску.

Фільтраційний простір основних газомістких порід Донбасу – вугілля і пісковиків – вельми чутливий до зовнішніх навантажень. Так, при об'ємному зусиллі стиснення зразків вугілля до 20 МПа в ньому залишається 14,1 % від початкового об'єму субмакропір, і зменшення об'ємів фільтруючого простору добре узгоджується з падінням газопроникності [1]. Згідно з результатами досліджень [1, 12], максимум падіння газопроникності в вугільних пластах пов'язаний з площиною, що перетинає пласт в зоні максимуму опорного тиску, і названий «порогом ущільнення». Цій площині відповідають також мінімальні значення пористості, що дає підстави розглядати цю площину, яка перетинає породи подрібненого масиву, в якості оболонки техногенного газового родовища. Таким чином можна припускати, що значний внесок у процес деформування гірської породи вносять порожнечі фільтраційного простору.

Результати та обговорення. Експериментальні дослідження поведінки зразків гірських порід в режимі контрольованих деформацій свідчать про те, що до моменту досягнення межі залишкової міцності об'єм цих зразків може збільшуватися до 20% (ділатансії) [2, 14-16 і ін.]. За даними, які встановлено в результаті узагальнення великої кількості натурних і лабораторних досліджень, коефіцієнт розпушення порід безпосередньої покрівлі на кордоні з областю завалених порід може становити 1,25-1,4, з віддаленням від пласта зменшується і на кордоні з зоною плавного прогину зменшується до 1,05 [3, 17]. Часткове розвантаження збільшує обсяг над- і подріблених вугільних пластів на 0,1-0,4 %, що призводить до розширення фільтруючих пір і тріщин і різкого збільшення об'єму метану, який десорбується з суміжних пластів, і підвищенню інтенсивності їх газовіддачі.

Доцільно зазначити, що ділатансійне руйнування на відміну від пружного деформування має незворотний характер. Переважна більшість гірських порід, що складають газонасичені вуглепородні масиви Донбасу, характеризуються підвищеною крихкістю, вплив зсувних деформацій на формозміни яких практично не має місця [16]. Таким чином, процес зростання тріщин як в об'ємі, так і в кількісному відношенні, є основною характеристикою зміни обсягу фільтраційного простору подрібненого масиву і, отже, його проникності.

В роботі [18] наведені результати досліджень проникності підробленого масиву на підставі оцінки проникності одиначної тріщини. Відомо, що проникність одиначної тріщини залежить від ступеня її розкриття і може бути визначена з виразу:

$$k_{mp} = 8,45 \times 10^6 \times b^2, \text{ м}^2, \quad (1)$$

де b – розкриття тріщини.

З (1) випливає, що при формозміні збільшення розкриття тріщини на порядок веде до зростання її проникності на два порядки. Однак проникність одиначної тріщини не характеризує проникність досліджуваної області масиву в цілому. Для переходу від проникності одиначної тріщини до проникності масиву праву частину рівняння (1) рекомендується помножити на тріщинну пористість масиву k_n :

$$k = 8,45 \times 10^6 \times b^2 \times k_n, \text{ м}^2. \quad (2)$$

Існують різні підходи до визначення тріщиної пористості. В роботі [130], зокрема, пропонується тріщинну пористість визначати з виразу:

$$k_n = T \times b, \quad (3)$$

де T – об'ємна щільність тріщин, $\text{м}^2/\text{м}^3$.

З урахуванням останнього виразу рівняння для визначення тріщиної проникності породного масиву (2) прийме наступний вигляд:

$$k = 8,45 \times 10^6 \times T \times b^3, \text{ м}^2 \quad (4)$$

Отже, збільшення розкритості тріщин фільтраційного об'єму породи-колектора на один порядок збільшує проникність цього об'єму на три порядки. Останнє твердження враховує масштабний ефект при переході від проникності одиначної тріщини (мікрорівень) до проникності масиву (макро- і мегарівень) і в цілому уточнює, а не суперечить висновкам, наведеним в [18]. Необхідно відзначити, що існують інші, відмінні від формули (3) аналітичні залежності для розрахунку тріщиної пористості [19-22 та ін.], але до кожної з них в якості лінійного множника входить параметр b – розкриття тріщин. Таким чином, незалежно від виду виразу для визначення тріщиної пористості, висновок, який отримано за залежністю (4), залишиться незмінним.

Деформування, як реакція гірської породи на зміну зовнішнього навантаження, протікає зі швидкістю, яка є дорівнює швидкості звуку в даній породі. Приблизно з такою ж швидкістю в гірській породі відбувається зростання і розкриття тріщин, що пояснює суттєві зміни в динаміці газовиділення при зміні напружено-деформованого стану масиву. Методи оцінки проникності, які базуються на розрахунках за аналітичними залежностями типу (2, 4), в інженерних розрахунках застосування не знаходять, оскільки не враховують вплив напружено-деформованого стану гірського масиву.

Висновок. Таким чином, структурно-текстурні особливості вуглепородного масиву у взаємозв'язку з протіканням газодинамічних процесів проявляються в зміні об'єму укладених в ньому пір і тріщин, які сумарно становлять простір фільтрації. Для урахування цих особливостей необхідно встановити функціональний взаємозв'язок між проникністю і напружено-деформованим станом гірських порід, які змінюються в результаті підробки.

References

1. Булат А.Ф., Звягильский Е.Л., Лукинов В.В. и др. (2008). Углепородный массив Донбасса как гетерогенная среда. К.: «Наукова думка». 411 с.
Bulat A.F., Zvyagil'skiy E.L., Lukinov V.V. i dr. (2008). Ugleporodnyi massiv Donbassa kak geterogennaya sreda. K.: «*Naukova dumka*», 411.
2. Шеннон Р. (1978). Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: «Мир». 418 с.
Shennon R. (1978). Imitatsionnoe modelirovanie sistem – iskusstvo i nauka. M.: «*Mir*», 418.
3. Кирничанский Г.Т. (1999). Элементы теории деформирования и разрушения горных пород. К.: *Наукова думка*. 179 с.

- Kirnichanskiy G.T. (1999). Elementy teorii deformirovaniya i razrusheniya gornyyh porod. *K.: Naukova dumka*, 179.
4. Сkochинский А.А., Ходот В.В., Гмошинский В.Г. и др. (1958). Метан в угольных пластах. *М.: Углетехиздат*. 256 с.
- Skochinskiy A.A., Hodot V.V., Gmoshinskiy V.G. i dr. (1958). Metan v ugolnyih plastah. *М.: Ugletehizdat*, 256.
5. Перепелица В.Г., Ефремов И.А. (2010). Особенности проявления сил вязкого трения при движении газовых потоков. *Геотехническая механика*, 91, 85–94.
- Perpelitsa V.G. & Efremov I.A. (2010). Osobennosti proyavleniya sil vyazkogo treniya pri dvizhenii gazovyih potokov. *Geotekhnicheskaya mehanika*, 91, 85–94.
6. Пучков В.А., Сластунов С.В., Каркашадзе Г.Г. и др. Способ извлечения метана на полях ликвидированных угольных шахт: патент РФ на изобретение № 2393353 от 27.06.2010.
- Puchkov V.A., Slastunov S.V., Karkashadze G.G. i dr. Sposob izvlecheniya metana na polyah likvidirovannyih ugolnyih shaht: patent RF na izobretenie # 2393353 ot 27.06.2010.
7. Баклашов И.В. (2004). Геомеханика: учебник для вузов. в 2 т. *М.: МГУ*. 208 с.
- Baklashov I.V. (2004). Geomehanika: uchebnik dlya vuzov. v 2 t. *М.: MGU*, 208.
8. Кучеренко С.А. (2008). Методы качественной и количественной оценка трещиноватости горных пород. *Геотехническая механика*, 78, 240–223.
- Kucherenko S.A. (2008). Metodyi kachestvennoy i kolichestvennoy otsenka treschinovatosti gornyyh porod. *Geotekhnicheskaya mehanika*, 78, 240–223.
9. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. (1979). Пластичность горных пород. *М.: Недра*. 301 с.
- Stavrogin A.N. & Protosenya A.G. (1979). Plastichnost gornyyh porod. *М.: Nedra*, 301.
10. Руппенейт К.В. (1957). Давление и смещение горных пород в лавах пологопадающих пластов. *М.: Углетехиздат*. 228 с.
- Ruppeneyt K.V. (1957). Davlenie i smeschenie gornyyh porod v lavah pologopadayuschih plastov. *М.: Ugletehizdat*, 228.
11. Агишев А.П. (1966). Межпластовые перетоки газа при разработке газовых месторождений. *М.: Недра*. 204 с.
- Agishev A.P. (1966). Mezhpastovyye peretoki gaza pri razrabotke gazovyih mestorozhdeniy. *М.: Nedra*. 204.
12. Перепелица В.Г., Шевелев Г.А., Кулинич В.С. и др. (2006). Изменение газовой проницаемости в напряженных горных породах. *Уголь Украины*, 3, 38–41.
- Perpelitsa V.G., Shevelev G.A., Kulinich V.S. i dr. (2006). Izmenenie gazovoy pronitsaemosti v napryazhennyih gornyyh porodah. *Ugol Ukrainyi*, 3, 38–41.
13. Нагорный В.П., Денисюк И.И., Петрушко С.В. (2009). Импульсная технология интенсификации добычи углеводородов. *Геотехническая механика*, 81, 232–238.
- Nagorniy V.P., Denisyuk I.I. & Petrushko S.V. (2009). Impulsnaya tehnologiya intensivatsii dobyichi uglevodorodov. *Geotekhnicheskaya mehanika*, 81, 232–238.
14. Василянский Н.П., Кочерга В.Н. (1985). Выделение метана на поверхность по тектоническим трещинам геологических нарушений. Создание безопасных условий труда в угольных шахтах: сб. науч. трудов. *Макеевка: МакНИИ*, 7–12.
- Vasilyanskiy N.P. & Kocherga V.N. (1985). Vydelenie metana na poverhnost po tektonicheskim treschinam geologicheskikh narusheniy. Sozdanie bezopasnyih usloviy truda v ugolnyih shahtah: sb.nauch.trudov. *Makeevka: MakNII*, 7–12.
15. Шашенко А.Н., Майхерчик Т., Сдвижкова Е.А. (2005). Геомеханические процессы в породных массивах. *Днепропетровск: Национальный горный университет*, 319 с.
- Shashenko A.N., Mayherchik T. & Sdvizhkova E.A. (2005). Geomehanicheskie protsessyi v porodnyih massivah. *Dnepropetrovsk: Natsionalnyiy gorniy universitet*, 319 s.
16. Шашенко А.Н., Солодянкин А.В., Мартовицкий А.В. (2012). Управление устойчивостью протяженных выработок глубоких шахт. *Днепропетровск: ТОВ «ЛизуновПресс»*, 384 с.

Shashenko A.N., Solodyankin A.V. & Martovitskiy A.V. (2012). Upravlenie ustoychivostyu protyazhennyih vyirabotok glubokih shaht. *Dnepropetrovsk: TOV «LizunovPress»*, 384.

17. Лукинов В.В., Клец А.П., Бокий Б.В. и др. (2011). Прогноз метановыделения из подработанных пород в выработки выемочного участка. *Уголь Украины, 01*, 50–53.

Lukinov V.V., Klets A.P., Bokiyy B.V. i dr. (2011). Prognoz metanovyideleniya iz podrobotannyih porod v vyirabotki vyiemochnoho uchastka. *Ugol Ukrainyi, 01*, 50–53.

18. Кузнецов Г.Н. (1954). О механизме взаимодействия боковых пород и крепи в очистных выработках пологопадающих угольных пластов. Исследования горного давления применительно к механизированным крепям. *М.: Углетехиздат*, 31–38.

Kuznetsov G.N. (1954). O mehanizme vzaimodeystviya bokovyih porod i krepі v ochistnyih vyirabotkakh pologopadayuschih ugolnyih plastov. Issledovaniya gornogo davleniya primenitelno k mehanizirovannym krepyam. *М.: Ugletehizdat*, 31–38.

19. Лукинов В.В., Безручко К.А. (2009). Чинники формування колекторських властивостей низькопористих теригенних порід. *Геологія і геохімія горючих копалин, 3–4*, 148–149.

Lukinov V.V. & Bezruchko K.A. (2009). Chinniki formuvannya kolektorskih vlastivostey nizkporistih terigennih porid. *Geologiya i geohimiya goryuchih kopalin, 3–4*, 148–149.

20. Безручко К.А., Приходченко А.В., Шпак В.Ю. (2013) Прогноз скоплений свободного метана в ловушках структурно-тектонического типа угленосной толщи. *Уголь Украины, 9*, 51–53.

Bezruchko K.A., Prihodchenko A.V. & Shpak V.Yu. (2013) Prognoz skopleniy svobodnogo metana v lovushkakh strukturno-tektonicheskogo tipa uglenosnoy tolschi. *Ugol Ukrainyi, 9*, 51–53.

21. Алексеев А.Д., Василенко Т.А., Ульянова Е.В. и др. (1999). Определение закрытой пористости ископаемых углей. *Уголь Украины, 4*, 20–23.

Alekseev A.D., Vasilenko T.A., Ulyanova E.V. i dr. (1999). Opredelenie zakryitoy poristosti iskopaemyih ugley. *Ugol Ukrainyi, 4*, 20–23.

22. Алексеев А.Д. (2010). Физика угля и горных процессов. *К: Наукова думка*, 423 с.

Alekseev A.D. (2010). Fizika uglya i gorniyh protsessov. *К: Naukova dumka*, 423.