

Костянтин БЕЗРУЧКО

Інститут геотехнічної механіки
ім. М. С. Полякова НАН України, Дніпропетровськ,
e-mail: gvrvg@meta.ua

**ВПЛИВ КАТАГЕНЕТИЧНОГО ЧИННИКА
НА КОЛЕКТОРСЬКІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ГАЗОНАСИЧЕНІСТЬ
ПІСКОВИКІВ ДОНБАСУ**

Дослідження пористості, густини, природної вологості, залишкової водонасиченості пісковиків Донецького басейну, які залягають у зонах поширення вугілля різного ступеня метаморфізму – від довгополуменевого до пісного, дозволили визначити вплив катагенетичних змін вугленосних відкладів на газонасиченість і фільтраційно-ємнісні властивості потенційних порід-колекторів.

Встановлено, що щільність пісковиків закономірно збільшується залежно від ступеня катагенетичних перетворень – для відкладів, які містять вугілля від довгополуменевого до пісного, середня об'ємна густина збільшується від $2,36 \cdot 10^3$ до $2,60 \cdot 10^3$ кг/м³, середня густина твердої фази – від $2,63 \cdot 10^3$ до $2,70 \cdot 10^3$ кг/м³, коефіцієнт відкритої пористості в середньому зменшується від 11,9 до 3,0 %.

Середні значення показника вагової вологості зменшуються, залежно від ступеня катагенетичних змін, від 1,56 % для пісковиків, що містять вугілля марки Д, до 0,59 % для пісковиків, які містять вугілля марки ПС. На відміну від вагової вологості, протилежну тенденцію має зміна відносної вологості (заповнення пор вологою) пісковиків. Отримані результати свідчать про збільшення середніх значень ступеня заповнення пор вологою від пісковиків, що містять вугілля марки Д (27,6 %), до пісковиків, що містять вугілля марки П (99,1 %). Високі значення ступеня заповнення пор вологою пісковиків, які містять вугілля марки П, дозволяють припустити, що відносна вологість пісковиків, які залягають у зоні поширення антрацитів, також близька до 100 %. Відповідно ступінь заповнення пор газом (показник, який доповнює ступінь пор вологою до 100 %), або відносна газонасиченість, у середньому зменшується від 72,4 % для пісковиків, пов'язаних з вугіллям марки Д, до пісковиків, що містять більш метаморфізоване вугілля. У зоні поширення пісного вугілля він дорівнює майже нулю.

Доведено, що в низькопористих пісковиках із коефіцієнтом відкритої пористості менш ніж 4,4 % поровий простір зайнятий переважно зв'язаною водою (адсорбційною та мікрокапілярною), вміст якої становить не менше половини (50 %).

Показано, що зростання природного відносного водонасичення пісковиків Донбасу в процесі катагенетичних змін зумовлене зростанням залишкової водонасиченості, переважно за рахунок мікрокапілярної вологи, що супроводжується зменшенням відносної газонасиченості.

Зменшення розміру фільтрувальних каналів і підвищення залишкової водонасиченості (збільшення вмісту зв'язаної води) під час катагенетичних змін зменшують ефективний об'єм порового простору та підвищують нижню межу відкритої порис-

тості колекторів порового типу. Поява тріщин природного або техногенного походження може суттєво збільшити ефективний об'єм порового простору та різко знизити нижню межу відкритої пористості колекторів, у яких частина порового простору зумовлена тріщинуватістю.

Ключові слова: Донецький басейн, пісковики, катагенез, колекторські властивості, газонасиченість.

Загальні ресурси метану у вугленосних відкладах України значно перевищують запаси природного газу. Усі геологічні передумови щодо виявлення газу на вугільних родовищах та світовий досвід видобутку шахтного метану вугільних родовищ свідчать про потенційну можливість організації промислового використання метану як альтернативного джерела енергії.

Роботи зі створення нової галузі з видобутку та утилізації метану вугільних родовищ в Україні стримуються через відсутність наукового обґрунтування умов формування скупчень метану у вугленосній товщі, яка має низку відмінностей порівняно із класичними газовими родовищами. Специфіка вугільних родовищ полягає в тому, що метан вугленосної товщі знаходиться переважно в розсіяному стані і є у вугільних пластах та вмісних породах слабкорухомим або нерухомим. Тому дослідження геологічних чинників, які визначають перерозподіл метану у вугленосній товщі, є актуальним для наукового обґрунтування закономірностей та умов формування природних і техногенних скупчень вільного метану.

Мета роботи – з'ясувати вплив геологічних процесів, і зокрема катагенетичного чинника, на фільтраційно-ємнісні властивості та газонасиченість пісковиків для визначення потенційної газонасиченості вугленосних відкладів.

Геологічні умови та фактори за масштабами впливу на формування властивостей і стан вуглепородного масиву поділяються на регіональні та локальні. Найбільш загальними, у регіональному плані, є умови катагенезу, які відображають спільну дію двох головних чинників – тиску і температури. Ці чинники тісно пов'язані між собою, і під час оцінки ступеня катагенетичних перетворень гірських порід переважно враховують температурні умови та той статичний тиск, яких зазнали вугленосні відклади під час максимального палеозанурення.

Визначити вплив катагенетичних змін вугленосних відкладів на фільтраційно-ємнісні властивості потенційних порід-колекторів дозволили дослідження пористості, густини, природної вологості, залишкової водонасиченості і газонасиченості пісковиків Павлоградсько-Петропавлівського, Красноармійського, Донецько-Макіївського, Південнодонбаського, Центрального, Алмазно-Мар'ївського та Краснодонського геолого-промислових районів Донецького басейну, які залягають у зонах поширення вугілля різного ступеня метаморфізму – від довгополуменевого до пісного.

У табл. 1 наведено середні значення коефіцієнта відкритої пористості, об'ємної густини та густини твердої фази пісковиків, що залягають у зонах поширення різного за марочним складом вугілля (марки вугілля від Д до П). Як видно з табл. 1, щільність пісковиків закономірно збільшується залежно від ступеня катагенетичних перетворень – для відкладів, які містять вугілля від довгополуменевого до пісного, об'ємна густина збільшується від $2,36 \cdot 10^3$ до

$2,60 \cdot 10^3$ кг/м³, густина твердої фази – від $2,63 \cdot 10^3$ до $2,70 \cdot 10^3$ кг/м³, коефіцієнт відкритої пористості зменшується від 11,9 до 3,0 %. Необхідно зазначити, що йдеться саме про середні значення показників для всього Донецького басейну, оскільки вони варіюють у досить широких межах і будь-яке значення показника окремого пісковика не свідчить про приналежність до того чи іншого ступеня катагенезу. Також доцільно відзначити, що мінімальні значення коефіцієнта відкритої пористості для пісковиків, що містять високо-метаморфізоване вугілля (стадії перетворень П, НА, А), можуть не перевищувати 1 %.

Великі коливання значень розглянутих показників фізичних властивостей пісковиків пояснюються впливом іншого регіонального чинника – впливу тектоніки, під дією якої може відбуватися погіршення колекторських властивостей. Оскільки окремі райони Донбасу зазнали різного тектонічного впливу під час геологічного розвитку та є відмінними за геологічною будовою, фізичні властивості гірських порід також суттєво відрізняються (табл. 2).

Також суттєво можуть відрізнятися за фізичними властивостями пісковики одного геолого-промислового району. До прикладу, коефіцієнт відкритої пористості пісковиків Центрального району на полі шахти “Комсомолец” становить: марка Ж – 4,58 %, К–ПС – 3,40 %; на ділянці розвідки “Горлівська-Глибока-2”: марка Ж – 2,82 %, марка К – 1,95 %, марка ПС – 1,65 %. Отже, особливо важливо враховувати тектонічний чинник під час систематизації та підготовки до аналізу результатів досліджень властивостей, безпосередньо пов’язаних з ущільненням гірських порід. Систематизація даних про фізичні властивості без урахування тектоніки додає певної похибки, збільшує варіацію значень (зростає дисперсія), що може призвести до помилкових висновків. Так, відкрита пористість пісковиків підводних виносів річок (ПВР)

Т а б л и ц я 1. Середні значення коефіцієнта відкритої пористості та густини пісковиків різного ступеня катагенетичних перетворень

Група метаморфізму	Об’ємна густина, 10 ³ кг/м ³	Густина твердої фази, 10 ³ кг/м ³	Коефіцієнт відкритої пористості, %
Д	2,36	2,63	11,9
Г	2,42	2,66	10,9
Ж	2,55	2,68	5,6
К	2,58	2,68	3,8
ПС	2,60	2,70	3,6
П	2,60	2,70	3,0

Т а б л и ц я 2. Значення коефіцієнта відкритої пористості пісковиків підводних виносів річок, що містять вугілля марок Г–Ж, у різних геолого-промислових районах Донбасу (Геологические..., 2012)

Геолого-промисловий район	Кількість визначень	Значення коефіцієнта відкритої пористості, %		
		мінімальне	максимальне	середнє
Центральний	13	2,36	2,75	2,60
Донецько-Макіївський	52	2,27	7,76	5,31
Красноармійський	7	4,31	11,20	7,53

у зоні поширення вугілля марки К Краснодонського району – 3,91 %, що приблизно дорівнює значенням відкритої пористості пісковиків того самого типу в Центральному районі, але вмісних вугілля марки Ж – 3,67 %. У цьому випадку помилка узагальнення становить цілу марку (Геологические..., 2012).

Також на абсолютні значення та коливання показників фізичних властивостей пісковиків суттєво може впливати літологічний чинник, який необхідно розглядати окремо.

Таким чином, загалом наголошується на існуванні закономірної тенденції збільшення об'ємної густини та густини твердої фази, зменшення коефіцієнта відкритої пористості на тлі катагенетичних перетворень пісковиків Донбасу.

Значення показників як абсолютної (вагової) (табл. 3), так і відносної (ступеня заповнення пор вологою) вологості (табл. 4) пісковиків також варіюють у широких межах, проте їхні коефіцієнти варіації зменшуються в міру збільшення ступеня катагенетичних змін (від зон розвитку довгополуменевого вугілля до пісного). Так, коефіцієнт варіації показника вагової вологості зменшується від 135,8 % (у зоні поширення вугілля марки Д) до 30,8 % (К) та 37,3 % (ПС) (див. табл. 3), коефіцієнт варіації значень ступеня заповнення пор вологою – від 120,5 % (Д) до 2,1 % (П) (див. табл. 4).

Зміна середніх значень, що характеризують кількісний вміст води пісковиків, які містять вугілля різних стадій метаморфізму, також має закономірний характер. Середні значення показника вагової вологості зменшуються,

Т а б л и ц я 3. Значення вагової вологості пісковиків різного ступеня катагенетичних змін

Група метаморфізму	Обсяг вибірки	Значення показника, %			Незміщена дисперсія	Коефіцієнт варіації, %
		мінімальне	максимальне	середнє		
Д	72	0,04	8,50	1,56	4,48	135,8
Г	1332	0,16	7,26	1,14	1,11	92,1
Ж	212	0,18	3,70	1,03	0,49	68,0
К	56	0,40	1,10	0,65	0,04	30,8
ПС	112	0,25	1,23	0,59	0,05	37,3

Т а б л и ц я 4. Значення відносної водонасиченості пісковиків різного ступеня катагенетичних змін

Група метаморфізму	Обсяг вибірки	Значення показника, %			Незміщена дисперсія	Коефіцієнт варіації, %
		мінімальне	максимальне	середнє		
Д	72	1,0	98,0	27,6	1106,40	120,5
Г	1332	3,8	96,7	33,0	444,70	63,9
Ж	212	6,3	100,0	53,5	533,40	44,9
К	56	52,4	100,0	75,5	286,00	22,4
ПС	112	50,3	100,0	84,5	476,30	25,8
П	16	94,0	100,0	99,1	4,41	2,1

залежно від ступеня катагенетичних змін, від 1,56 % для пісковиків з вугіллям марки Д до 0,59 % для пісковиків, які містять вугілля марки ПС (див. табл. 3), що підтверджує загальновідоме положення про те, що гірські породи в міру ущільнення під час катагенетичних змін втрачають вологу, яка міститься в їхньому поровому просторі.

На відміну від вагової вологості, протилежну тенденцію має зміна відносної вологості (заповнення пор вологою) пісковиків залежно від ступеня катагенетичних перетворень вугленосних відкладів. Отримані результати свідчать про збільшення середніх значень ступеня заповнення пор вологою від пісковиків, що містять вугілля марки Д (27,6 %), до пісковиків з вугіллям марки П (99,1 %) (див. табл. 4). Середні значення ступеня заповнення пор вологою, наведені в табл. 4, розраховані за тими самими пробами, що і середні значення показника вагової вологості в табл. 3. Високі значення ступеня заповнення пор вологою пісковиків, які містять вугілля марки П, дозволяють припустити, що відносна вологість пісковиків, які залягають в зоні поширення антрацитів, також близька до 100 %.

Відповідно ступінь заповнення пор газом (показник, який доповнює ступінь пор вологою до 100 %), або відносна газонасиченість, у середньому зменшується від 72,4 % для пісковиків, пов'язаних з вугіллям марки Д, до пісковиків з більш метаморфізованим вугіллям. У зоні поширення пісного вугілля він дорівнює майже нулю (рис. 1).

Слід зауважити, що значення показників вологості також можуть коливатися в широких межах, тому присутність пісковика в зоні залягання вугілля тієї чи іншої марки не є підставою для висновку про ступінь заповнення його пор вологою чи газом. Однак наведені дані дозволяють установити тенденцію зміни газонасиченості пісковиків залежно від ступеня їхніх катагене-

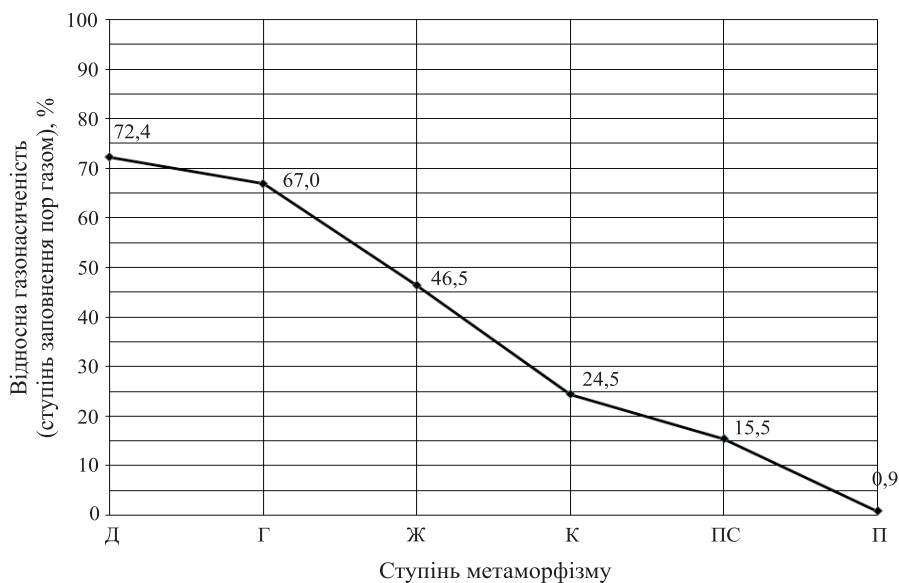


Рис. 1. Вплив ступеня катагенетичних змін на середню відносну газонасиченість пісковиків Донбасу

тичних перетворень. Відносна газонасиченість зменшується від пісковиків, що містять вугілля низьких стадій метаморфізму, до пісковиків, поширених у зонах розвитку високометаморфізованого вугілля. Подібним чином має змінюватися і газонасиченість пісковиків, яка значною мірою зумовлена газонасиченістю. Під час переходу від районів поширення вугілля марок Д–Г до зон розвитку вугілля марок ПС–П погіршуються колекторські властивості пісковиків, зменшується їхня газонасиченість, газопроникність і, як наслідок, газонасиченість.

Зниження газонасиченості пісковиків із збільшенням ступеня регіонального метаморфізму вугілля підтверджується багатьма фактами. Із зонами поширення вугілля марок Д–Ж пов'язана більшість газових покладів Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) (Геологія..., 1989). Із підвищенням ступеня постдіагенетичних перетворень чисельність газових покладів різко знижується, і на 4–5 етапах мезокатагенезу (вугілля марок К та ПС) вони майже відсутні. У роботі (Задара, 1983) наведені дані, що газонасиченість пісковиків в умовах, сприятливих для нагромадження і збереження вільного газу, сягає $6\text{--}10\text{ м}^3/\text{м}^3$ у вугільних родовищах із довгополуменевим та газовим вугіллям і $4\text{--}23\text{ м}^3/\text{м}^3$ у газових родовищах на глибинах $1,5\text{--}2,0$ км. У пісковиках з вугіллям марок ПС–П кількість метану не перевищує $0,5\text{--}1,0\text{ м}^3/\text{м}^3$, і лише в окремих зонах (горизонтах) тріщинуватих пісковиків кількість вільного газу може досягати $3,5\text{--}6,2\text{ м}^3/\text{м}^3$. У породах, що містять високометаморфізовані антрацити, метану майже немає.

У зв'язку із газонасиченістю пісковиків слід згадати про таке явище, як викиди порід та газу, виникнення яких зумовлене складною взаємодією напруженого стану гірського масиву, властивостей газонасичених гірських порід та технологією проходки гірничих виробок. Усі зазначені фактори, крім газового, присутні під час розробки вугільних пластів будь-якої марки. Напружений стан гірського масиву та фізико-механічні властивості порід, притаманні пісковикам, пов'язаним з вугіллям низького ступеня метаморфізму, можуть спостерігатися в зонах розвитку більш метаморфізованого вугілля. Але викиди порід та газу в зонах поширення вугілля марок ПС–П до цього часу не зареєстровані, у зонах розвитку коксового вугілля трапляються дуже рідко. Це можна пояснити тим, що при підвищенні ступеня катагенетичних перетворень пісковиків газовий фактор поступово втрачає свою роль, тобто, викиди не виникають у зв'язку із зниженням газонасиченості та газонасиченості пісковиків.

Крім того, підвищення відносної вологості пісковиків у міру збільшення ступеня постдіагенетичних змін вугленосних відкладів на тлі зниження абсолютної вологості свідчить про те, що в процесі постдіагенетичних перетворень на стадіях середнього катагенезу, глибинного катагенезу та початкового метагенезу об'єм порового простору пісковиків скорочується швидше, ніж з нього виділяється волога, що й приводить до збільшення ступеня заповнення пор вологою.

На наступному етапі дослідження впливу катагенетичних змін на фільтраційно-емнісні властивості пісковиків доцільним є отримання кількісної закономірності, що відображає вплив ступеня постдіагенетичних змін вугленосних відкладів на природну вологість пісковиків. Кількісно ступінь

перетворення пісковиків у процесі постдіагенетичних змін може бути схарактеризований такими показниками, як коефіцієнт відкритої пористості і коефіцієнт ущільнення. Коефіцієнт ущільнення (K_y) є відношенням об'ємної густини (δ_n) до густини твердого компонента гірської породи (δ_p).

Діапазон змін коефіцієнта ущільнення пісковиків Донбасу – від 0,6 у зоні розвитку вугілля низьких стадій метаморфізму до майже 1,0 у зоні розвитку високометаморфізованого вугілля. Основні числові характеристики показників вологості і ступеня ущільнення пісковиків наведено в табл. 5.

Результати кореляційно-регресійного аналізу показників вологості пісковиків та відповідних коефіцієнтів ущільнення підтверджують наявність зв'язку між ступенем змін пісковиків у процесі постдіагенетичних перетворень та їхньою природною вологістю. Кореляційне відношення, що характеризує залежність показника вагової вологості від коефіцієнта ущільнення, становить 0,70; ступеня заповнення пор вологою від коефіцієнта ущільнення – 0,35 (табл. 6). Зв'язок показника вагової вологості з коефіцієнтом ущільнення описується рівнянням

$$W = 5,03 - 40,95K_y + 35,86K_y^{1/2}. \quad (1)$$

Вплив постдіагенетичних змін вугленосних відкладів на природну вологість пісковиків підтверджують також результати кореляційно-регресійного аналізу показників вологості та відкритої пористості. Основні числові характеристики цих величин наведено в табл. 7. Залежність показника вагової вологості від коефіцієнта відкритої пористості характеризується кореляційним відношенням, яке дорівнює 0,50 (табл. 8), і найповніше описується рівнянням

$$W = 0,97 - 0,15K_n + 0,02K_n^2. \quad (2)$$

Таким чином, зі зниженням відкритої пористості абсолютна вологість пісковиків також зменшується. Між ступенем заповнення пор вологою і коефіцієнтом відкритої пористості виявляється зворотній зв'язок, про що свідчить негативне значення лінійного коефіцієнта кореляції, з кореляційним відношенням, яке дорівнює 0,57 (див. табл. 8). Ця залежність може бути апроксимована рівнянням

$$G = 90,56 - 11,57K_n + 0,54K_n^2. \quad (3)$$

Аналогічні рівняння регресії були отримані під час дослідження кореляційних залежностей між фізичними параметрами при вивченні низькопористих колекторів ДДЗ (Федишин, 2005), а саме між коефіцієнтом залишкової водонасиченості і коефіцієнтом відкритої пористості, для Червонозаводського та Свиридівського родовищ відповідно:

$$K_{зв} = 97,91 - 17,34K_n + 0,87K_n^2, \quad (4)$$

$$K_{зв} = 94,94 - 18,60K_n + 1,20K_n^2, \quad (5)$$

де $K_{зв}$ – коефіцієнт залишкової водонасиченості, %.

Залишкова водонасиченість – це показник, який відображає кількість води, зв'язаної твердою поверхнею гірської породи. Він широко застосовується як одна з головних характеристик колекторських властивостей гірських порід нафтових і газових родовищ. Фізично залишкова вода – це вода, що міститься в породах та утримується в пористому середовищі поверхнево-молекулярними і капілярними силами (Ханин, 1969), тобто адсорбційна (мономолекулярного та полімолекулярного шарів) і мікрокапілярна. Таким чином,

Таблиця 5. Значення вологості та коефіцієнта ущільнення пісковиків

Показник	Обсяг вибірки	Значення показника			Дисперсія	Середньо-квдратичне відхилення	Коефіцієнт варіації	Коефіцієнт асиметрії	Експес
		міні-мальне	максимальне	середнє					
Вагова вологість, %	180	0,180	12,240	2,220	4,200	2,05	92,3	2,32	6,34
Ступінь заповнення пор вологою, %	180	6,300	100,000	57,900	723,980	26,91	46,5	-0,01	-1,15
Коефіцієнт ущільнення	180	0,635	0,985	0,898	0,004	0,06	7,1	-1,63	3,18

Таблиця 6. Результати кореляційно-регресійного аналізу вологості й ущільнення пісковиків

Показники, що корелюються	Обсяг парних спостережень	Коефіцієнт кореляції	Середньо-квдратичне відхилення коефіцієнта кореляції	Коефіцієнт надійності коефіцієнта кореляції	Значущість лінійної залежності	Кореляційне відношення	Значущість нелінійної залежності	Показник лінійності	Суттєвість відмінності нелінійного зв'язку
Ступінь заповнення пор вологою— коефіцієнт ущільнення	180	0,20	0,07	2,74	значуща	0,35	значуща	0,09	суттєва

Т а б л и ц я 7. Значення вологості та відкритої пористості пісковикив

Показник	Обсяг вибірки	Значення показника			Дисперсія	Середньо-квадратичне відхилення	Коефіцієнт варіації	Коефіцієнт асиметрії	Екцес
		міні-мальне	макси-мальне	середнє					
Вагова вологість, %	487	0,08	7,26	1,08	1,01	1,005	93,3	3,18	12,52
Ступінь заповнення пор вологою, %	480	3,50	100,00	42,50	696,14	26,380	62,1	0,61	-0,60
Коефіцієнт відкритої пористості, %	487	0,37	19,87	7,08	13,51	3,680	51,9	0,37	0,03

Т а б л и ц я 8. Результати кореляційно-регресійного аналізу вологості і відкритої пористості пісковикив

Показники, що корелюються	Обсяг парних спостережень	Коефіцієнт кореляції	Середньо-квадратичне відхилення коефіцієнта кореляції	Коефіцієнт надійності коефіцієнта кореляції	Значущість лінійної залежності	Кореляційне відношення	Значущість нелінійної залежності	Показник лінійності	Суттєвість відмінності нелінійного зв'язку
Ступінь заповнення пор вологою— коефіцієнт відкритої пористості	480	-0,45	0,04	12,37	значуща	0,57	значуща	0,12	суттєва

зв'язана вода, що міститься в порах гірських порід, визначає ємність порового простору, недоступного для газу, немов доповнюючи тверду фазу породи, зменшуючи її пористість. Водночас вільна (гравітаційна) вода може витіснятися газом за певних умов, і за достатнього об'єму та тиску останнього може формуватися газовий поклад.

У першому випадку методика випробування гірських порід передбачала герметизацію відібраних проб для подальшого транспортування, зберігання та визначення вологості в лабораторних умовах методом висушування до постійної маси (Інструкція..., 1989). Стандартна методика визначення залишкової водонасиченості передбачає насичення зразків вологою при безпосередньому контакті з водою, видалення гравітаційної (вільної) вологи способом центрифугування і подальше визначення вологості шляхом висушування до постійної маси (ГСТУ 41-00032626-00-025-2000). Отже, залежність (3) характеризує ступінь заповнення пісковиків вологою в природному стані, а залежності (4) і (5) – максимальну молекулярну вологоємність, тобто, здатність порід зв'язувати та утримувати воду.

Схожість рівняння зв'язку між природною водонасиченістю та коефіцієнтом відкритої пористості пісковиків Донбасу із залежностями залишкової водонасиченості від відкритої пористості, отриманими для пісковиків ДДЗ, свідчить про те, що за низьких коефіцієнтів відкритої пористості (менш ніж 4,4 %) значна частина порового простору (понад 50 %) зайнята зв'язаною вологою. Тобто, відносна вологість у міру збільшення ступеня постдіагенетичних змін пісковиків зростає внаслідок підвищення вмісту зв'язаної вологи.

У літературі наведено багато даних, які підтверджують, що породи з відкритою пористістю менш ніж 5 % мають залишкову водонасиченість 65–70 % (Ханин, 1969; Ромм, 1985; Федішин, 2005). У роботах (Геологические..., 1974; Забигайло и др., 1983) справедливо наголошується, що вміст води і форми її знаходження залежать від глибини та структури порового простору гірських порід, і висловлюється припущення про те, що на невеликих глибинах, у зоні активного водообміну, підземні води, вочевидь, знаходяться у всіх видах – від хімічно зв'язаної до гравітаційної. Із збільшенням глибини залягання, погіршенням колекторських властивостей гірських порід і підвищенням ступеня метаморфізму вугілля вологість зменшується, у порах знаходиться переважно гігроскопічна і капілярна вода (Геологические..., 1974; Забигайло и др., 1983). Цього, у цілому вірного висновку дійшли без урахування того факту, що в процесі постдіагенетичних перетворень відносна водонасиченість, як вже неодноразово наголошувалося вище, на відміну від вагової вологості, зростає і на стадіях пізнього катагенезу може сягати водонасичення, близького до граничного (90–100 %). Отже, адсорбційна та капілярна вода не тільки переважає над іншими видами вологи, але й займає основну (більш ніж 50 %) частину порового простору. Дослідження вологості, за різних температур, дозволили авторам вказаних робіт (Геологические..., 1974; Забигайло и др., 1983), дійти висновку про форму знаходження вологи в порах пісковиків глибоких горизонтів: у тих випадках, коли волога переважно заповнює весь об'єм пор, вона представлена головним чином гравітаційною і капілярною водою. Цей висновок також потребує уточнення. Він цілком справедливий для пісковиків з високими значеннями коефіцієнта

відкритої пористості. Низькопористі пісковики (менш ніж 4,4 %), у разі вологонасичення, близького до 100-відсоткового, містять переважно адсорбційну і мікрокапілярну воду.

Таким чином, колекторські властивості гірських порід зі збільшенням ступеня постдіагенетичних змін погіршуються як через зменшення об'єму порового простору (зниження відкритої пористості), так і збільшення вмісту зв'язаної води, що, зрештою, визначає різке зниження проникності в міру зменшення ефективного порового простору і пояснює логарифмічний (експоненціальний) характер зв'язку між проникністю і пористістю, як відкритою, так і ефективною.

На рис. 2 (Лукинов, Безручко, 2009) у вигляді суцільної лінії представлена залежність коефіцієнта відкритої пористості, за якого проникність дорівнює $1 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ (1 мД), від розміру основних фільтрувальних каналів, відповідно до формули

$$K_{\text{п}} = \sqrt{\frac{8K_{\text{пр}}}{r^2}} = \frac{2,83}{r} \sqrt{K_{\text{пр}}}, \quad (6)$$

де $K_{\text{пр}}$ – коефіцієнт абсолютної проникності, м^2 ; $K_{\text{п}}$ – коефіцієнт відкритої пористості, частки одиниці; r – розмір основних фільтрувальних каналів, м.

Формула (6) для визначення коефіцієнта відкритої пористості як функції розміру головних фільтрувальних каналів за заданої проникності дозволяє розрахувати граничне значення пористості, за якого порода починає набувати ознаки колектора промислового типу, згідно з класифікацією (Ханин, 1969), тобто, значення відкритої пористості, за якого проникність перевищить $1 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ (1 мД).

Формула (6) відповідає капілярно-статистичній структурній математичній моделі порового простору А. Маршалла (Marshall, 1958) для зцементованих порід, які належать до колекторів порового типу. Ця модель безпосеред-

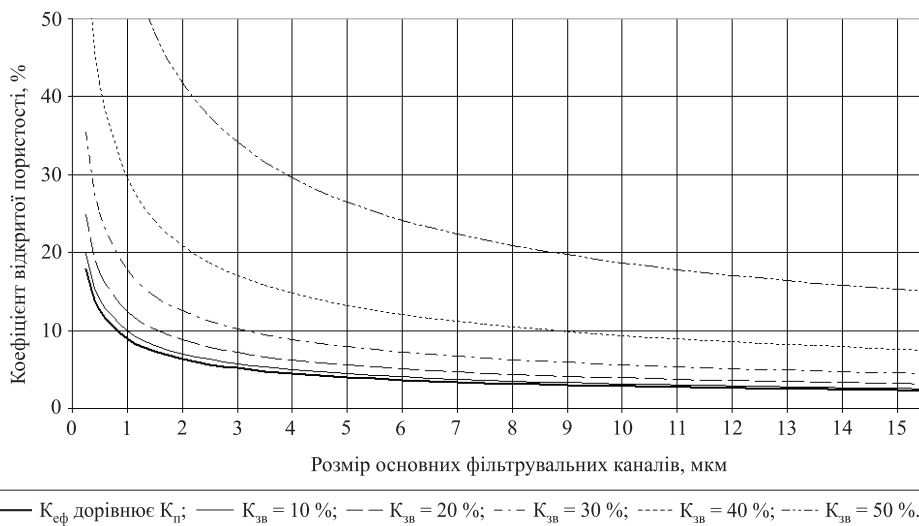


Рис. 2. Залежність граничного значення пористості колектора (проникність $1 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$) від розміру фільтрувальних каналів за змінної залишкової водонасиченості $K_{\text{зв}}$

ньо пов'язує пористість і абсолютну проникність з кривою капілярного тиску за відомим рівнянням Лапласа. Принципова важливість моделі в тому, що зв'язок між фізичними властивостями гірських порід отримано без кількісних припущень про геометрію пор, до прикладу, чинника звивистості, а на підставі лише деяких статистичних міркувань про закономірності з'єднання різних капілярів один з одним (Ромм, 1985).

Перевірка різними авторами, за даними вивчення зразків гірських порід, у т. ч. й пісковиків, достовірності отриманих А. Маршаллом співвідношень підтвердила, що запропонована капілярно-статистична модель достатньо ефективно показує зв'язок між основними властивостями піщаних порід-колекторів нафти і газу (Ромм, 1985). Слід зазначити також, що саме цю модель успішно використав В. М. Добринін (Добрынин, 1970) для побудови теорії стисливості колекторів в умовах природного залягання, відзначивши, що рівняння А. Маршалла є найбільш зручним для визначення зміни коефіцієнта проникності від тиску та температури. Рівняння задовільняє досить складну модель ізотропного середовища, представленого довільно розташованими за перетином циліндричними порами різних діаметра та довжини з різкими переходами від одного діаметра до іншого шляхом руху флюїду.

Область, розташована над суцільною лінією, характеризує породи з покращеними фільтраційними параметрами, які можуть бути колектором, натомість область під суцільною лінією – породи з низькою проникністю (до $1 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ (1 мД)). Слід зауважити, що суцільна лінія на графіку, наведеному на рис. 2, відображає зв'язок проникності з відкритою пористістю та розмірами основних фільтрувальних каналів, без урахування зв'язаної вологи, яку можуть містити породи. Іншими словами, вказаний графік (суцільна лінія) відповідає випадку, коли ефективна пористість K_{ef} дорівнює відкритій K_{n} . За наявності зв'язаної води граничні значення пористості, що розділяють породи з покращеними колекторськими властивостями від низькопроникних порід, переміщуються до області вищих значень коефіцієнта відкритої пористості. До прикладу, за залишкової водонасиченості 10 % та розмірів фільтрувальних каналів $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ (1 мкм), граничне значення коефіцієнта відкритої пористості колектора для проникності $1 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ (1 мД) становитиме 9,9 %; за залишкової водонасиченості 20 % – 12,4 %; за 30 % – 17,7 % і т. д.

Таким чином, зменшення розміру фільтрувальних каналів та підвищення залишкової водонасиченості (збільшення вмісту зв'язаної води) під час катагенетичних змін зменшують ефективний об'єм порового простору і підвищують нижню межу відкритої пористості колекторів порового типу.

Обґрунтовано прийнявши ширину розкритості тріщин гірських порід такою, що становить щонайменше 10–15 мкм (Лукінов, Безручко, 2009), розглянемо праву частину наведеного графіка (див. рис. 2). Вона відображає проникність і відкриту пористість порід з розмірами основних фільтрувальних каналів $(1,0 - 1,5) \cdot 10^{-5} \text{ м}$ (10–15 мкм) та характеризує колектори тріщинного типу, які можуть набувати високої проникності (понад $1 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ (1 мД)), за коефіцієнта відкритої пористості 2,3–2,8 %, що також цілком відповідає відомим даним про фактичну пористість тріщинних колекторів (Ханин, 1969; Прошляков и др., 1987). Це дає можливість стверджувати, що поява тріщин природного або техногенного походження може суттєво збільшити ефективний

об'єм порового простору та різко знизити нижню межу відкритої пористості колекторів, у яких частина порового простору зумовлена тріщинуватістю.

Отримані результати дослідження впливу катагенетичних змін вугленосних відкладів на фільтраційно-ємнісні властивості пісковиків дозволяють дійти висновку.

Щільність пісковиків Донбасу закономірно збільшується залежно від ступеня катагенетичних перетворень – для відкладів, які містять вугілля від догополуменового до пісного, об'ємна густина в середньому збільшується від $2,36 \cdot 10^3$ до $2,60 \cdot 10^3$ кг/м³, густина твердої фази – від $2,63 \cdot 10^3$ до $2,70 \cdot 10^3$ кг/м³, що супроводжується зменшенням середніх значень коефіцієнта відкритої пористості від 11,9 до 3,0 %.

Відносна вологість пісковиків (ступінь заповнення пор вологою), на відміну від їхньої абсолютної вологості (вагової вологості), зростає в міру ущільнення і скорочення пористості в процесі катагенетичних змін вугленосних відкладів у середньому для всього Донецького басейну від 27,6 % (марка Д) до 99,1 % (марка П), натомість одночасно відносна газонасиченість зменшується від 72,4 % (марка Д) майже до 0 % (марка П).

Зростання природного відносного водонасичення пісковиків Донбасу під час катагенетичних змін зумовлене зростанням залишкової водонасиченості, переважно за рахунок мікрокапілярної вологи, що супроводжується зменшенням відносної газонасиченості.

У низькопористих пісковиках із коефіцієнтом відкритої пористості менш ніж 4,4 % поровий простір зайнятий переважно зв'язаною водою (адсорбційною та мікрокапілярною), вміст якої становить не менше половини (50 %).

Вологість пісковиків, що містять високометаморфізоване вугілля, коливається в більш вузьких межах порівняно з пісковиками, які залягають в зоні розвитку менш метаморфізованого вугілля, що, найімовірніше, пов'язано з колекторськими (ємнісними) властивостями, які і визначають діапазон коливання природної вологості.

Тенденція підвищення відносної вологості пісковиків під час катагенетичних перетворень вугленосних відкладів, на тлі зниження абсолютної вологості, свідчить про те, що в процесі змін скорочення об'єму порового простору пісковиків відбувається швидше, ніж видалення з нього вологи.

Зменшення розміру фільтрувальних каналів та підвищення залишкової водонасиченості (збільшення вмісту зв'язаної води) під час катагенетичних змін зменшують ефективний об'єм порового простору та підвищують нижню межу відкритої пористості колекторів порового типу. Поява тріщин природного або техногенного походження може суттєво збільшити ефективний об'єм порового простору та різко знизити нижню межу відкритої пористості колекторів, у яких частина порового простору зумовлена тріщинуватістю.

Зростання відносної вологості пісковиків у процесі катагенетичних змін від зони розвитку вугілля низьких стадій метаморфізму (марка Д) до зони поширення більш високометаморфізованого вугілля (марка П) приводить до зниження викидонебезпечності гірських порід у тому самому ряді.

Геологические основы и методы прогноза выбросоопасности угля, пород и газа / А. Ф. Булат, В. В. Лукинов, Л. И. Пимоненко и др. – Днепропетровск : Монолит, 2012. – 360 с.

Геологические факторы выбросоопасности пород Донбасса / В. Е. Забигаило, А. З. Широков, И. С. Белый и др. – Киев : Наук. думка, 1974. – 270 с.

Геология и нефтегазоносность Днепровско-Донецкой впадины. Нефтегазоносность / Б. П. Кабышев, П. Ф. Шпак, О. Д. Билык и др. – Киев : Наук. думка, 1989. – 204 с.

ГСТУ 41-00032626-00-025-2000. Коефіцієнт залишкового водонасичення гірських порід. Методика виконання вимірювань методом центрифугування зразків : Видання офіційне : затв. Мінекоресурсів України : надано чинності з 1 січня 2001. – К. : Мінекоресурсів України, 2001. – 19 с.

Добрынин В. М. Деформации и изменения физических свойств коллекторов нефти и газа. – М. : Недра, 1970. – 239 с.

Забигаило В. Е., Лукинов В. В., Широков А. З. Выбросоопасность горных пород Донбасса. – Киев : Наук. думка, 1983. – 288 с.

Задара Г. З. Геологические условия и прогноз метаноносности углеводородных пород северо-западной части Донбасса : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук : 04.00.16. – Днепропетровск : ДГИ, 1983. – 24 с.

Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля, породы и газа. – М. : Недра, 1989. – 191 с.

Лукинов В. В., Безручко К. А. Чинники формування колекторських властивостей низькопористих теригенних порід. Стаття 2. Обґрунтування фільтраційних параметрів межі колектор–екран низькопористих теригенних порід // Геологія і геохімія горючих копалин. – 2009. – № 3–4 (148–149). – С. 5–17.

Прошляков Б. К., Гальянова Т. И., Пименов Ю. Г. Коллекторские свойства осадочных пород на больших глубинах. – М. : Недра, 1987. – 200 с.

Ромм Е. С. Структурные модели порового пространства горных пород. – Л. : Недра, 1985. – 240 с.

Федшин В. О. Низькопористі породи-колектори газу промислового значення. – К. : УкрДГРІ, 2005. – 148 с.

Ханин А. А. Породы-коллекторы нефти и газа и их изучение. – М. : Недра, 1969. – 368 с.

Marshall A. Relation between permeability and size distribution of pores // J. Soil Sci. – 1958. – N 1 (9). – P. 2–7.

Стаття надійшла
05.06.13

Kostiantyn BEZRUCHKO

**INFLUENCE OF CATAGENETIC FACTOR ON RESERVOIR PROPERTIES
AND GAS SATURATION OF DONBAS SANDSTONES**

Researches of porosity, density, natural moisture content, residual water saturation of Donets Basin sandstones, occurred in the coal expansion areas of different degree of metamorphism – from long-flame to the lean, have permitted to determine the influence of changes in coal-bearing deposits on gas saturation and filtration-capacitive properties of potential reservoir rocks.

It was found that the density of sandstone regularly increases depending upon degree of catagenetic changes – for deposits that contain coal from long-flaming to lean, average volumetric density increases from $2.36 \cdot 10^3$ to $2.60 \cdot 10^3$ 103 kg/m^3 , the average density of the solid phase increases from $2.63 \cdot 10^3$ to $2.70 \cdot 10^3$ kg/m^3 , open porosity coefficient on average decreases from 11.9 to 3.0 %.

Average index value of weight moisture decreases, depending on the degree of catagenetic changes from 1.56 % for sandstones containing rank of coal D, to 0.59 % for sandstones containing rank of coal OS. Alternatively to weight moisture, change of relative humidity has the opposite tendency (pores are filled with moisture) of sandstones. Obtained results show an increase of average values of degree of pores filling with moisture from sandstones containing coal of rank D (27.6 %) to sandstones containing lean coal (99.1 %). High values of the degree of pore filling with moisture of sandstone containing lean coal suggest that the sandstones relative humidity occurred in the area of anthracite expansion, is close to 100 %.

Correspondingly, the degree of pore filling with gas (an indicator that complements the degree of pore moisture up to 100 %) or the relative gas saturation on average decreases from 72.4 % for sandstone connected with long-flame coal, to sandstones containing more metamorphosed coal. In the area of lean coal expansion it is practically zero.

It is proved that in low-porous sandstones with open porosity coefficient less than 4.4 %, pore space is occupied mainly with bound water (adsorption and microcapillary), the content of which is not less than half (50 %).

It is shown that the growth of natural relative water saturation of Donbas sandstones in the process of catagenetic changes is caused by the increase of residual water saturation, mainly due to microcapillary humidity, accompanied by the decrease of the relative gas saturation.

It is concluded that decreasing the size of filter channels and increasing residual water saturation (increase of bound water content) at catagenetic changes decrease the effective volume of the pore space and increase the open porosity lower limit of porous type reservoir. Cracking of natural or technogenic origin can significantly increase the effective volume of the porous space and deflate the open porosity lower limit of reservoirs in which part of the porous space is caused by fracturing.