

С.А. Вижва, В.А. Михайлов, Д.І. Онищук, І.І. Онищук

ПЕТРОФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ НЕТРАДИЦІЙНИХ ПОРІД-КОЛЕКТОРІВ ПІВДЕННОГО НАФТОГАЗОВОГО РЕГІОНУ

Розглянуто особливості методики та результати петрофізичних досліджень складнопобудованих колекторів. Показано зв'язок петрофізичних параметрів з ємнісними властивостями пісковиків, алевролітів і вапняків із перспективних на вуглеводні інтервалів свердловин Південного нафтогазового регіону. Побудовано кореляційні залежності петрофізичних параметрів від ємнісних властивостей досліджуваних порід.

Ключові слова: теригенні колектори, коефіцієнт пористості, коефіцієнт проникності, питомий електричний опір, інтервальний час.

Вступ. Глинисті сланці традиційно розглядають як покриття над колекторами, що містять вуглеводні. До недавнього часу вони не становили практичного інтересу як можливе промислове джерело газу. При цьому в деяких районах глинисті сланці містять значну кількість органічної речовини $C_{орг}$ і газу. Слід зазначити, що газонасні глинисті сланці поширені практично на всіх континентах. На сучасному етапі розвитку геологічних знань і новітніх технологій видобутку вуглеводнів у поєднанні з розширенням економічних потреб стало очевидно, що з багатих на органічну речовину глинистих сланців можна добувати газ у великих обсягах і з економічно прийнятною за нинішніх умов собівартістю. Тому розробка цих родовищ, незважаючи на її досить високу вартість, стала доцільною лише останнім часом.

На цей час у багатьох країнах Америки, Азії та Європи (США, Канада, Китай, Росія, Італія, Норвегія, Польща, Румунія та ін.) проводять інтенсивні геолого-геофізичні дослідження з метою розробки ефективних методів вивчення та оцінки нетрадиційних джерел вуглеводнів (сланцевий газ, сланцева нафта, газ ущільнених колекторів, газ вугільних родовищ) і підвищення продуктивності експлуатаційних свердловин. Ці джерела вуглеводнів достатньо перспективні й для України [8–10, 12, 13].

Основою технології видобутку вуглеводнів з нетрадиційних джерел є буріння горизонтальних свердловин з подальшим гідророзривом у продуктивному інтервалі розрізу. Важливою частиною цієї технології є петрофізичні та геофізичні дослідження і на їх основі математичне моделювання, що забезпечують навігацію горизонтального стовбура свердловини гідророзриву та його параметри.

Проблема пошуків і вивчення нетрадиційних джерел вуглеводнів (сланцевий газ, сланцева нафта, газ ущільнених колекторів, газ вугільних родовищ) на території України набуває все

більшої актуальності. Оцінка перспективності нетрадиційних джерел вуглеводнів геологічних структур і комплексів ґрунтується насамперед на аналізі економічних та геолого-геометричних параметрів, вмісту органічної речовини $C_{орг}$, ступеня термічної переробки порід тощо. Важливе значення мають і петрофізичні параметри гірських порід, які використовують під час інтерпретації матеріалів геофізичних досліджень пошуково-розвідувальних свердловин, а також оцінки параметрів гідророзриву пласта. Слід зауважити, що петрофізичні дослідження до недавнього часу були спрямовані передусім на вивчення традиційних порід-колекторів, тому петрофізичні параметри нетрадиційних порід-колекторів є слабко вивченими або не вивченими. Під час інтерпретації матеріалів геофізичних досліджень свердловин (ГДС) низькопористі породи з об'єму продуктивних колекторів виключали, тому що загальноприйняті якісні та кількісні критерії промислових колекторів за матеріалами ГДС характеризують їх як "щільні", практично непроникні. Непридатність наявних критеріїв для їх виділення та прогнозування існуючими методами інтерпретації матеріалів ГДС зумовлює необхідність розробки принципово нових геологічних моделей складнопобудованих розрізів, достовірність яких має бути обґрунтована петрофізичними моделями.

Мета проведених досліджень – оцінка петрофізичних параметрів нетрадиційних порід-колекторів перспективних ділянок Південного нафтогазового регіону (НГР) як основа комплексного аналізу їх фізичних властивостей.

Зв'язок між даними свердловинних та польових геофізичних методів і ємнісно-фільтраційними характеристиками є досить складними. Вони потребують ретельного вивчення комплексом лабораторних петрофізичних досліджень.

Одними із найінформативніших параметрів при визначенні петрофізичних властивостей

гірських порід є питомий електричний опір і швидкість поширення пружних хвиль. Питомий електричний опір визначають за речовинним складом і текстурою породи; структурою ємнісного простору; її нафто-, газо- та водонасиченістю; коефіцієнтом пористості; мінералізацією пластових вод; температурою і тиском [1–6; 11, 16].

Питомий електричний опір і швидкість поширення пружних хвиль у породах-колекторах визначають для уточнення меж останніх у певних типах і групах порід; виділення окремих стратиграфічних горизонтів, розрізів і фацій; встановлення характеру залежності їх від мінерального складу, структури порового простору, співвідношення фаз речовини; виявлення характеру зміни цих параметрів під час епігенетичного перетворення і метаморфічних змін гірських порід.

Особливий інтерес становить виявлення основних факторів, що впливають на зміну питомого електричного опору. Зокрема, комплексні петрографічні, геохімічні та петроелектричні дослідження дають змогу встановити зв'язки між електричним опором і мінеральним складом зразків ядра. За допомогою петроелектричних досліджень до і після екстрагування зразків та після їх насичення моделлю пластової рідини оцінюють вплив солей і пустот на цей параметр. Відомості, одержані в результаті лабораторних досліджень питомого електричного опору, використовують під час інтерпретації результатів електрометричних методів досліджень свердловин та польової електророзвідки, а швидкості поширення пружних хвиль – під час інтерпретації результатів акустичних методів досліджень свердловин і польової сейсмозвідки.

У статті наведено результати комплексних досліджень петрофізичних властивостей 103 зразків ядра свердловин Південного НГР: Субботіна-1, інт. 1948–2343 м; Субботіна-403, інт. 2596–2733 м; Матроська-1, інт. 1053–1775 м; Шмідта-6, інт. 3580–3632 м; Шмідта-9, інт. 3110–3139 м; Шмідта-11, інт. 2957–2972 м; Гамбурцева-2, інт. 2080–3460 м; Голицина-6, інт. 1810–1820 м; Голицина-7, інт. 570–580 м; Голицина-9, інт. 2095–2105 м; Голицина-12, інт. 2705–2715 м; Архангельська-21, інт. 867–878 м; Джанкойська-1, інт. 845–892 м; Північноказантипська-3, інт. 1042–2597 м. Породи представлені переважно аргілітами, алевролітами, різнозернистими пісковиками та вапняками.

Методика досліджень. Комплекс експериментальних лабораторних досліджень включав визначення: густини досліджених порід (сухих і насичених газом); відкритої пористості (методами насичення азотом і газом); коефіцієнта залишкового водонасичення; коефіцієнта проникності (методом стаціонарної фільтрації азоту); інтервального часу (швидкості поширення поздовжніх пружних хвиль) та питомого електричного опору.

Об'ємну густину досліджених порід у сухому стані визначали через зважування та визначення геометричних розмірів спеціальних лабораторних зразків, а насичених зразків – методом гідростатичного зважування за стандартною методикою [6, 16]. Для вимірювань застосовували цифрові аналітичні ваги WPS 360/с/2 (точність $\pm 0,001$ г).

Коефіцієнт відкритої пористості визначали ваговим методом з використанням цифрових аналітичних ваг WPS 360/с/2 за насичення зразків гірських порід розчином NaCl – моделлю пластової води з використанням стандартних методик, а також способом насичення зразка азотом під тиском (газоволюметричним) за допомогою спеціально розробленої установки.

Коефіцієнт залишкового водонасичення визначали способом зважування зразків під час їх центрифугування за допомогою центрифуги ОС-6М. Обертovu швидкість ротора центрифуги змінювали від 1000 до 6000 об/хв з кроком 1000 об/хв, тиск витіснення – від 0,2 до 1 МПа [11].

Коефіцієнт проникності зразків ядра визначали методом стаціонарної фільтрації азоту за допомогою спеціально розробленої установки [14]. Виконано два цикли вимірювання після екстрагування зразків у хлороформі та спиртобензольній суміші.

Лабораторні електрометричні вимірювання сухих зразків ядра виконані при температурі 20 °С за допомогою цифрового тераомметра С.А.6547, який дає змогу виконувати високоточні вимірювання електричного опору в діапазоні від 10 кОм до 10 ТОм з цифровим записом на ЕОМ за спеціальною програмою на постійному струмі за двоелектродною схемою. Для вимірювання зразків, насичених розчином NaCl, застосовували прецизійний цифровий RLC-метр МНС-1100, що характеризується підвищеною точністю вимірювання електричного опору в діапазоні від 10^{-6} до 10^{12} Ом за частот 0 Гц – 100 кГц. Циліндричні зразки вставляли у спеціальний кернотримач з електродами, що не поляризуються і виготовлені із спеціальної графітенованої гуми [1–3].

З метою встановлення залежності петроелектричних параметрів від ступеня водонасиченості порід провели серію електрометричних вимірювань і побудували кореляційні залежності між коефіцієнтом водонасичення (k_v) і параметром насичення (P_n).

Швидкість поширення пружних хвиль визначали на лабораторних зразках за допомогою цифрової установки “Керн-4”, зразки вставляли у спеціальний кернотримач. Для дослідження швидкостей поширення пружних хвиль у гірських породах застосовували імпульсно-фазовий ультразвуковий метод [15]. Ультразвукові дослідження зразків було проведено для різних станів (після екстрагування, за повного насичення газом і роз-

чином NaCl). Швидкість поширення поздовжніх хвиль вимірювали на зразках, орієнтованих уздовж нашарування.

Аналіз даних. В результаті виконаних лабораторних досліджень встановлено, що об'ємна густина сухих зразків змінюється в досить широких межах – від 1313 (алевроліт, Архангельська площа) до 2638 кг/м³ (пісковик дрібнозернистий, площа Субботіна), за її середнього значення 2111 кг/м³. Широкі межі зміни об'ємної густини досліджених зразків порід свідчать про мінливість їх літологічного складу та пористості.

У разі насичення зразків газом об'ємна густина досліджуваних порід змінюється від 1728 (алевроліт, Архангельська площа) до 2662 кг/м³ (пісковик дрібнозернистий, площа Субботіна), середнє

значення 2291 кг/м³. Діапазон змін цього параметра залежно від різновидів порід для досліджених площ наведено в табл. 1. Середня відносна похибка визначень коефіцієнта пористості – 1 %.

При визначенні перспектив нафтогазоносності геологічних утворень важливими є відомості про пустотний простір породи, що характеризується пористістю та проникністю – здатністю породи пропускати через себе флюїди, структурою порідколекторів і вмістом води залежно від капілярного тиску, а також звивистістю порових каналів.

Структура осадових порід характеризується формою та ступенем обкоченості зерен, їх розмірами, сортуванням, орієнтацією і упаковкою, а також хімічним складом. Відомості про діагенетичні й катагенетичні процеси та про механізми, які дія-

Таблиця 1. Змінення фільтраційно-ємнісних параметрів досліджених порід деяких перспективних площ Південного НГР

Порода	Значення параметра	Густина зразків, кг/м ³			Відкрита пористість, %		Проникність, фм ²	Коефіцієнт залишкового водонасичення
		сухих	насичених газом	позірна мінералогічна	азот	газ		
Площа Субботіна								
Алевроліт	min	2048	2222	2619	15,8	13,4	6,17	0,52
	max	2285	2386	2636	24,4	22,2	30,55	0,82
	Середнє	2191	2322	2630	19,3	16,8	13,65	0,71
Пісковик	min	2037	2213	2619	4,7	3,1	0,13	0,54
	max	2638	2662	2724	24,3	22,4	12,83	0,80
	Середнє	2290	2393	2641	15,9	13,3	4,82	0,68
Матроська площа								
Пісковик	min	1986	2175	2612	10,7	9,0	0,37	0,56
	max	2430	2500	2671	25,9	24,1	8,23	0,83
	Середнє	2209	2338	2642	18,3	16,5	3,27	0,69
Вапняк	min	2069	2198	2474	13,4	11,1	0,08	0,88
	max	2316	2405	2612	20,8	17,5	4,61	0,94
	Середнє	2167	2283	2540	18,1	14,8	1,10	0,92
Площа Шмідта								
Вапняк	min	2448	2472	2524	3,2	1,8	0,01	0,74
	max	2597	2611	2684	5,9	5,3	0,45	0,94
	Середнє	2546	2572	2634	4,8	3,4	0,28	0,83
Площа Гамбурцева								
Вапняк	min	2438	2508	2597	1,5	0,7	0,01	0,75
	max	2605	2627	2686	10,5	9,0	0,06	0,89
	Середнє	2558	2585	2650	4,8	3,5	0,03	0,81
Площа Голіцина								
Алевроліт	min	1426	1831	2527	6,6	0,3	–	–
	max	2621	2629	2636	34,2	28,4	–	–
	Середнє	1980	2225	2583	18,4	14,0	–	–
Архангельська площа								
Алевроліт	min	1313	1728	2529	28,2	26,0	–	–
	max	1495	1883	2584	38,1	31,7	–	–
	Середнє	1419	1821	2546	33,1	28,5	–	–
Джанкойська площа								
Аргіліт	min	1586	1947	2434	26,2	18,9	–	–
	max	1662	2002	2606	27,2	23,2	–	–
	Середнє	1615	1965	2510	26,7	21,7	–	–
Пісковик	min	1552	1930	2550	26,1	22,4	–	–
	max	1620	1983	2562	27,2	24,3	–	–
	Середнє	1587	1959	2556	26,5	23,4	–	–
Північноказантипська								
Алевроліт	min	1459	1857	2529	22,9	16,0	1,66	–
	max	1897	2228	2698	32,1	27,5	18,74	–
	Середнє	1662	2025	2603	26,4	22,3	10,20	–

ли під час транспортування і відкладення осадового матеріалу, його ущільнення та деформації можуть бути отримані на основі вивчення вищенаведених параметрів. Проникність і пористість визначаються структурою породи. Відповідно, пісковики, складені великими, добре відсортованими зернами, зазвичай мають більшу пористість, ніж дрібнозернисті пісковики із слабевідсортованими зернами. Зміни розміру і форми часточок, а також розподіл порових каналів у породі дають змогу прогнозувати зміни проникності.

Важливим параметром є властивість породи вмщати флюїди (нафту, газ і воду). Породи характеризуються пористістю, яка визначається сукупністю порожнин у її мінеральному скелеті. Пористість гірської породи визначає ємність колектору. Розрізняють загальну, відкриту та ефективну пористість гірських порід [5, 6]. Структури порового простору порід залежать від їх текстури та структури. Вирізняють відкриту й ефективну пористість і параметр форматів α_n різних видів пористості.

Коефіцієнт відкритої пористості досліджених порід, визначений ваговим методом за насичення зразків керна гасом, змінюється від 0,3 (алевроліт, площа Голицина) до 31,7 % (алевроліт, Архангельська площа) за середнього значення 16 %. Коефіцієнт відкритої пористості, визначений за допомогою насичення циліндричних зразків азотом під тиском 0,25 МПа (“за азотом”), змінюється від 1,5 (вапняк, площа Гамбурцева) до 38,1 % (алевроліт, Архангельська площа) за середнього значення 19,3 %. Зростання значень коефіцієнтів відкритої пористості за насичення азотом пояснюється проникненням газу в капілярні пори, в які не може потрапити рідина. Кореляційна залежність (рис. 1) між пористістю порід, визначеною методами гідростатичного зважування та газоволюметричним, має вигляд: $k_{п,гас} = 0,863 \cdot k_{п,азот} - 0,602$, при $R^2 = 0,98$, де $k_{п,азот}$ – відкрита пористість, визначена за насиченням азотом; $k_{п,гас}$ – відкрита пористість, визначена способом гідростатичного зважування за насичення гасом.

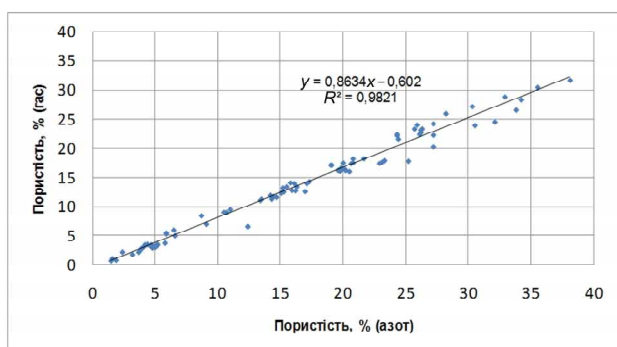


Рис. 1. Кореляційна залежність між пористістю порід, визначена способом гідростатичного зважування і газоволюметричним методом

За даними табл. 1, більшість досліджених порід належать до V–III класів колекторів [4].

Залежно від літологічного складу за коефіцієнтом відкритої пористості породи віднесено: алевроліти – до V–II класів колекторів (пористість від дуже низької до високої); пісковики – до V–III (пористість від дуже низької до середньої); вапняки – до V–III класів колекторів (пористість від дуже низької до середньої).

Проникність – властивість породи пропускати флюїди по сполучених порах. Проникність породи залежить від її ефективної пористості, тобто на неї впливають розмір зерен породи, їхня форма, розподіл зерен за розмірами (сортування) та їх упаковка, а також ступінь консолідації й цементації. На проникність впливає тип глинистого або іншого цементувального матеріалу між піщаними зернами, особливо за наявності прісної води. Деякі глинисті мінерали, зокрема смектити (бентоніти) і монтморилоніти, розбухають у прісній воді і можуть частково або повністю закупорювати поровий простір.

Абсолютна проникність характеризується коефіцієнтом k (який називають проникністю) за насичення породи на 100 % одним флюїдом (або фазою), таким як газ, нафта або вода. Якщо ж порода містить більше одного флюїду, проникність для кожного з них характеризується ефективною проникністю (при цьому k_n , k_r , k_b – ефективні проникності для нафти, газу, води відповідно). Рухаючись по порових каналах, пластові флюїди взаємодіють між собою, заважаючи один одному, тому сума ефективних проникностей усіх трьох фаз завжди менша за абсолютну проникність. За наявності в породі більше ніж одного флюїду вводять поняття відносної проникності (k_r) для цієї фази – це відношення ефективної проникності для будь-якої фази до абсолютної проникності породи. Таким чином, відносні проникності для нафти, газу та води дорівнюють: $k_{rn} = k_n/k$, $k_{rr} = k_r/k$, $k_{rb} = k_b/k$ відповідно.

Породи-колектори можуть мати первинну проникність, яку визначають як проникність матриці (мінерального каркаса) породи, і вторинну проникність. Первинна проникність (проникність матриці) формується в процесі відкладення і літифікації (консолідації) осадових порід. Вторинна проникність – результат зміни матриці породи в процесі ущільнення, цементації, утворення тріщин і вилугування. Процеси ущільнення та цементації зменшують проникність, тоді як утворення тріщин і вилугування збільшують її. Внаслідок наявності вторинної проникності відбувається основна міграція флюїдів у низькопористих карбонатах та аргілітах.

Проникність порід-колекторів нафти і газу змінюється від 0,1 до 1000 фм² і більше. За проникністю оцінюють якість колектора: низька,

$k < 1$ фм²; задовільна, $1 \text{ фм}^2 < k < 10 \text{ фм}^2$; середня, $10 \text{ фм}^2 < k < 50 \text{ фм}^2$; висока, $50 \text{ фм}^2 < k < 250 \text{ фм}^2$; дуже висока, $k > 250 \text{ фм}^2$. Колектори, які мають проникність, нижчу за 1 фм^2 , вважають щільними. Такою низькою проникністю зазвичай характеризуються аргіліти, алевроліти, щільні газоносні пісковики та матриця вапняків. Підвищують проникність порід, використовуючи гідророзрив і кислотну обробку пласта, що дає змогу видобувати вуглеводні із слабопроникних колекторів, які раніше вважали некондиційними.

В результаті вимірювань коефіцієнта абсолютної проникності циліндричних зразків керна методом стаціонарної фільтрації азоту [14] встановлено, що коефіцієнт проникності досліджених порід змінюється від 0,01 (вапняк, площі Шмідта і Гамбурцева) до 30,5 фм² (алевроліт, площа Субботіна) за середнього значення 4,19 фм². Значення коефіцієнта проникності для різних порід досліджених площ наведено в табл. 1. Середня відносна похибка вимірів 1,9 %.

За коефіцієнтом проникності досліджені породи віднесено до IV–V класів колекторів [4]. Згідно з даними табл. 1, за цим показником з урахуванням літологічного складу досліджені породи віднесено: алевроліти (проникність 1,66–30,5 фм², середнє значення 13,5 фм²) і пісковики (проникність 0,13–12,83 фм², середнє значення 4,94 фм²) – до V–III класів колекторів (проникність від дуже низької до середньої); вапняки (проникність 0,01–4,61 фм², середнє значення 0,74 фм²) – до V–IV класів колекторів (проникність від дуже низької до низької).

Флюїдонасиченість – відносний ступінь заповнення пор тим чи іншим флюїдом – є достатньо важливою властивістю породи. Її визначають як частку загального об'єму, що зайнята флюїдом – нафтою, газом або водою. Поклад вуглеводнів через різницю густини пластових флюїдів формується таким чином, що в пласті теригенних порід залягають (зверху вниз): газ, нафта, вода. При цьому реліктова (залишкова) вода утворює включення майже повсюдно в межах покладу вуглеводнів. Реліктова вода – це морська вода, що опинилася в поровому просторі осаду під час його відкладення і літифікації набагато раніше того часу, коли нафта мігрувала в породу-колектор. Крім густини в межах покладу на розподіл цих трьох флюїдів впливають змочуваність і міжфазовий поверхневий натяг, що змінюють первинну картину.

В поровому просторі майже завжди є залишкова вода, вміст якої змінюється від 100 % (нижче зони нафтонасичення) і теоретично до нуля (над її контактом з вільною водою). Однак на практиці навіть набагато вище перехідної зони вода–нафта спостерігається майже постійний незнижуваний вміст зв'язаної води, або залишкова

водонасиченість. Величина і висота перехідної зони залежать від розміру пор і структури породи. Перехідна зона характеризується змінною водонасиченістю.

Коефіцієнт залишкового водонасичення для досліджених порід змінюється від 0,52 (алевроліт, площа Субботіна) до 0,94 (вапняк, площі Шмідта і Гамбурцева) за середнього значення 0,77 (табл. 1).

Електричні властивості гірських порід пов'язані з різними фізико-геологічними факторами і складають фізичну основу застосування методів електророзвідки та електрокаротажу. Результати вивчення електричних властивостей широко використовують під час петрофізичних досліджень, геохімічних пошуків, ГДС, для вирішення гідрогеологічних та інженерно-геологічних завдань. Електропровідність гірських порід зумовлена спрямованим рухом носіїв заряду (електронів, іонів і дірок) під дією зовнішнього електричного поля. Розрізняють струми провідності наскрізний, абсорбційний (пов'язаний з релаксаційною поляризацією, спадає з часом, відстань, яку проходять заряджені частинки, обмежена), ємнісний (результат поляризації зміщення та зарядки геометричної міжелектродної ємності). Електричний струм, що виникає в природних системах, є результуючою складовою усіх указаних вище струмів. Опір електричному струму спричиняє хаотичне (теплове) переміщення заряджених частинок, він залежить від будови електронної оболонки атомів, кристалохімічних структур мінералів та іонізаційних властивостей розчинів електролітів. За природою електропровідності виділяють: провідники (електронні та іонні), напівпровідники і діелектрики.

Основним параметром геоелектричних методів є питомий електричний опір – властивість речовини протидіяти проходженню електричного струму. Питомий електричний опір визначають за речовинним складом породи, температурою і тиском, за якими вимірюють цю величину [4–6]. Як уже зазначалося, в гірській породі на цей параметр впливає низка факторів, що зумовлює його зміну в широких межах.

За результатами лабораторних вимірювань, питомий електричний опір, виміряний на сухих екстрагованих зразках (питомий електричний опір мінерального скелета), змінюється від 372 (вапняк, Матроська площа) до 107 560 Ом·м (аргіліт, Джанкойська площа), середнє значення 14 850 Ом·м (табл. 2). Значні варіації параметра пояснюють неоднорідностями в текстурі порід (нааявність глинистих і піщанистих прошарків та їх неупорядкованість, а також вуглефікація й піритизація порід).

Відносно низьким питомим електричним опором мінерального скелета (< 10000 Ом·м) характеризуються переважно алевроліти площі Суббо-

Таблиця 2. Межі змін електричних і пружних параметрів досліджених порід деяких перспективних площ Південного НГР

Порода	Значення параметра	Питомий електричний опір зразків, Ом·м		Відносний електричний опір	Швидкість поширення пружних хвиль у зразках, м/с		Інтервальний час у зразках, мкс/м	
		сухих	насичених		сухих	насичених	сухих	насичених
Площа Субботіна								
Алевроліт	min	688	2,1	5,6	2475	2841	353	297
	max	2389	3,5	9,1	2833	3367	404	352
	Середнє	1582	2,9	7,5	2646	3147	379	319
Пісковик	min	2821	1,3	6,0	2104	2806	268	217
	max	87879	11,9	53,1	3731	4608	475	356
	Середнє	14301	4,0	18,2	2747	3373	375	304
Матроська площа								
Пісковик	min	515	1,2	7,2	2146	2494	311	246
	max	20632	5,4	31,4	3215	4065	466	401
	Середнє	8768	3,2	18,7	2737	3282	377	321
Вапняк	min	372	2,1	12,3	3185	3413	275	207
	max	714	2,6	15,4	3636	4831	314	293
	Середнє	560	2,4	13,9	3464	4084	290	249
Площа Шмідта								
Вапняк	min	1055	16,6	71,2	4386	5181	175	167
	max	24167	50,3	196	5714	5988	228	193
	Середнє	7924	33,8	120	5045	5612	199	179
Площа Гамбурцева								
Вапняк	min	651	8,7	50,4	4149	4950	170	165
	max	95873	43,3	252,0	5882	6061	241	202
	Середнє	23965	26,6	155,2	5027	5395	202	186
Архангельська площа								
Алевроліт	min	1726	–	–	2075	2457	426	371
	max	3254	–	–	2347	2695	482	407
	Середнє	2450	–	–	2237	2588	448	387
Аргіліт	min	8974	–	–	2331	2793	364	314
	max	107555	–	–	2747	3185	429	358
	Середнє	50440	–	–	2564	2975	391	337
Пісковик	min	45813	–	–	2083	2469	466	365
	max	102386	–	–	2146	2740	480	405
	Середнє	66411	–	–	2115	2607	473	384
Алевроліт	min	1243	–	–	2571	2849	329	281
	max	3911	–	–	3040	3559	389	351
	Середнє	2542	–	–	2885	3242	348	311

тіна, деякі різновиди різнозернистих пісковиків площ Субботіна і Матроської та вапняки площ Шмідта, Матроської і Гамбурцева. Понижений електричний опір цих порід пов'язаний з підвищенням вмістом глинистої компоненти, частково вуглефікацією та піритизацією.

Високі й підвищені значення цього параметра мінерального скелета (> 100 000 Ом·м) отримано для аркозових і кварцових пісковиків з детритом площ Субботіна і Матроської та вапняків мікритових площ Шмідта і Гамбурцева.

За аналізом результатів лабораторних електрометричних досліджень питомого електричного опору порід, насичених моделлю пластової води, встановлено, що цей параметр змінюється від 1,2 (пісковик, Матроська площа) до 50,3 Ом·м (вапняк мікритовий, площа Шмідта), середнє значення 11,9 Ом·м (табл. 2).

Низьким питомим електричним опором порід, насичених моделлю пластового розчину NaCl (< 8 Ом·м), характеризуються деякі різновиди

пісковиків площ Субботіна і Матроської, алевролітів площі Субботіна та вапняків Матроської площі. Понижений електричний опір цих порід спричинений вуглефікацією, піритизацією та підвищенням вмістом глинистої компоненти.

Підвищений питомий електричний опір порід, насичених моделлю пластового розчину NaCl (> 15 Ом·м), зафіксований у деяких різновидів вапняків площ Шмідта і Гамбурцева, що пов'язано з відносно зниженим вмістом глинистої компоненти (табл. 2). Середня відносна похибка визначень питомого електричного опору – 2,5 %.

У результаті лабораторних електрометричних досліджень визначено відносний електричний опір та його зміни для різних типів порід досліджених ділянок. Відповідно до аналізу даних, він змінюється від 5,6 (аледрит, площа Субботіна) до 252 (вапняк мікритовий, площа Гамбурцева), середнє значення 53 (табл. 2).

Низьким відносним електричним опором (<30) характеризуються алевроліти площі Суббо-

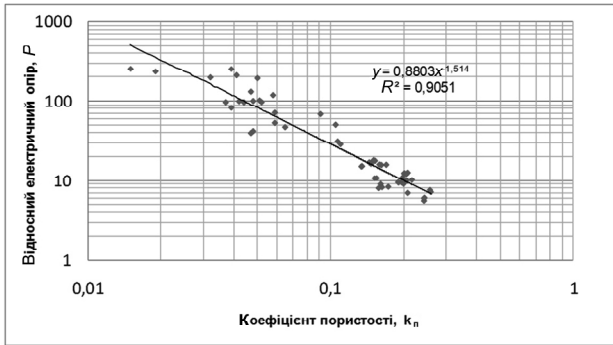


Рис. 2. Кореляційна залежність коефіцієнта пористості (k_n) та відносного електричного опору (P) – рівняння Арчі–Дахнова

тіна, деякі різновиди різнозернистих пісковиків площ Субботіна і Матроської та вапняки Матроської площі. Понижений відносний електричний опір цих порід пов'язаний з вуглефікацією, піритизацією та підвищенням вмістом глинистої компоненти.

Підвищений відносний електричний опір (> 80) зафіксований для різновидів вапняків площ Шмідта і Гамбурцева. Підвищення цього параметра пов'язане з відносно зниженою пористістю.

В результаті аналізу матеріалів лабораторних досліджень побудована кореляційна залежність (рис. 2) між коефіцієнтом пористості (k_n) і відносним електричним опором (P) за даними стосовно згаданих свердловин. Слід зазначити, що дані різних свердловин досить добре узгоджуються і є можливість використовувати єдину залежність для досліджених порід.

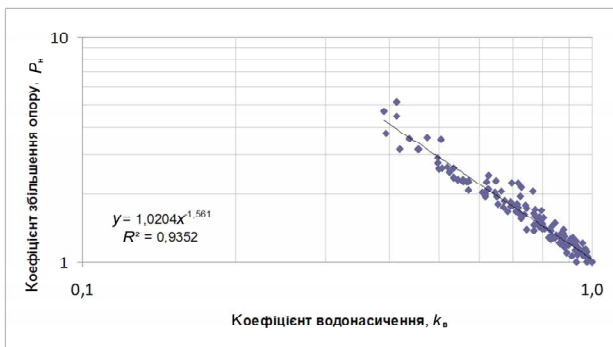
Загальне рівняння Арчі–Дахнова для дослідженої колекції зразків порід має вигляд

$$P = 0,88 \cdot k_n^{-1,514}, \text{ при } R^2 = 0,905.$$

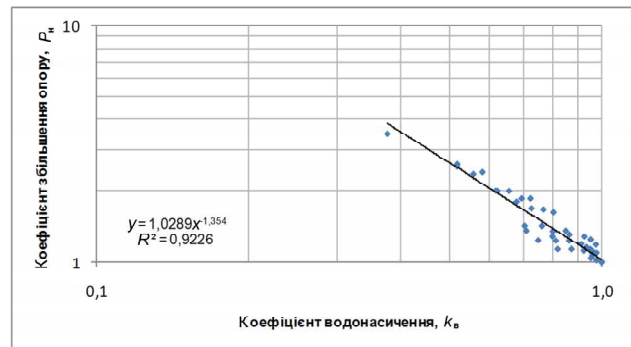
Експериментальними лабораторними дослідженнями встановлено залежності петрофізичних параметрів від ступеня водонасиченості порід. Водонасиченість порід змінювали центрифугуванням за допомогою центрифуги ОС-6М. При цьому виконували електрометричні вимірювання. В результаті побудовано кореляційні залежності (рис. 3) між коефіцієнтом водонасичення (k_b) і коефіцієнтом збільшення опору (P_n) для основних літологічних типів досліджених порід – пісковиків, алевролітів і вапняків. Коефіцієнт збільшення опору визначали за виразом $P_n = \rho_{нв}/\rho_{пв}$, де $\rho_{нв}$ – питомий електричний опір неповністю водонасичених порід, $\rho_{пв}$ – питомий електричний опір повністю водонасичених порід. Кореляційні залежності коефіцієнта збільшення опору від коефіцієнта водонасичення досліджених порід визначені для керна, придатного для центрифугування.

Визначені кореляційні рівняння мають вигляд: $P_n = 1,02 \cdot k_b^{-1,561}$ при $R^2 = 0,94$ (пісковики); $P_n = 1,029 \cdot k_b^{-1,354}$, при $R^2 = 0,92$ (алевроліти), $P_n = 1,018 \cdot k_b^{-1,718}$ при $R^2 = 0,75$ (вапняки); де $P_n = \rho_{нв}/\rho_{пв}$, $\rho_{пв}$ – питомий електричний опір повністю водонасичених порід, $\rho_{нв}$ – питомий електричний опір пластової води.

Аналіз даних показав, що для пісковиків коефіцієнт збільшення електричного опору змінюється від 1 до 5,2, середнє значення 1,56;



а



б



в

Рис. 3. Кореляційна залежність між коефіцієнтом водонасиченості (k_b) і коефіцієнтом збільшення опору (P_n) для пісковиків (а), алевролітів (б) і вапняків (в)

коефіцієнт водонасичення – від 1 до 0,39, середнє значення 0,81. Для алевролітів P_n змінюється від 1 до 3,5, середнє значення 1,45; коефіцієнт водонасичення – від 1 до 0,38, середнє значення 0,82; для вапняків P_n змінюється від 1 до 2,2, середнє значення 1,26; коефіцієнт водонасичення – від 1 до 0,32, середнє значення 0,88.

Модуль показника степеня n у рівнянні типу $P_n = b \cdot k_n^{-n}$ зростає в ряду алевроліти–пісковики–вапняки і становить: 1,354 – алевроліти; 1,561 – пісковики; 1,718 – вапняки. Значення параметра b практично однакове для всіх типів досліджених порід і змінюється від 1,018 до 1,029.

Ультразвукові дослідження зразків було проведено для різних їх станів (сухих, після екстрагування та при насиченні гасом). За даними інверсії швидкості поширення поздовжніх хвиль встановлені значні варіації інтервального часу поширення пружних хвиль у матриці твердого скелета, що пов'язано із змінами літологічного складу зразків керна.

Швидкість поширення пружних хвиль, визначена для сухих зразків після екстрагування, змінюється від 2075 (аргіліт, Архангельська площа) до 5882 м/с (вапняк мікритовий, площа Гамбурцева), середнє значення 3336 м/с; за насичення зразків розчином NaCl – від 2457 (аргіліт, Архангельська площа) до 6061 м/с (вапняк, площа Гамбурцева), середнє значення 3835 м/с (табл. 2, середня відносна похибка визначень швидкості 1,5 %).

Інтервальний час, визначений для сухих зразків після екстрагування, змінюється від 170 (вапняк, площа Гамбурцева) до 482 мкс/м (аргіліт, Архангельська площа), середнє значення 327 мкс/м; за насичення зразків розчином NaCl – від 165 (вапняк, площа Гамбурцева) до 407 мкс/м (аргіліт, Архангельська площа), середнє значення 280 мкс/м (табл. 2).

В результаті ультразвукових лабораторних досліджень встановлено кореляційний зв'язок інтервального часу та коефіцієнта пористості, визначених в лабораторних умовах (рис. 4):

$$dt = 820,77 \cdot k_n + 173,67 \text{ при } R^2 = 0,84.$$

При цьому використані дані стосовно всіх вищезначених свердловин, які доволі добре узгоджуються.



Рис. 4. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості (k_n) та інтервальним часом (dt)

Висновки. За даними петрографічних досліджень зразків керна порід Південного НГР встановлено, що за складом це алевроліти, пісковики та вапняки. Трапляються прошарки глинистого матеріалу, включення органічних решток, сидериту, вуглефікація та піритизація.

Мінливість літологічного складу та пористості зумовлює значні варіації об'ємної та позірної мінералогічної густини досліджених порід.

Відкрита пористість та абсолютна проникність також змінюються в досить широких межах. За значеннями коефіцієнтів пористості та абсолютної проникності досліджені породи віднесені переважно до III–V класу колекторів. Окремі зразки порід з підвищеною проникністю (більше 10 фм²) мають видиму тріщинуватість, що свідчить про їх крихкість та сприятливі умови для гідророзриву.

Спостерігаються значні варіації питомого опору досліджених порід. Відносно низькими питомими електричними опорами мінерального скелета (< 10 000 Ом·м) характеризуються здебільшого алевроліти площі Субботіна, деякі різновиди різнозернистих пісковиків площі Субботіна і Матроської та вапняки площі Шмідта, Матроської і Гамбурцева. Понижений електричний опір цих порід викликаний підвищеним вмістом глинистої компоненти, частково вуглефікацією та піритизацією. Високі та підвищені питомі електричні опори мінерального скелета (> 100 000 Ом·м) відмічені у аркозових і кварцових пісковиків з детритом площі Субботіна і Матроської та вапняків мікритових площі Шмідта і Гамбурцева. В результаті комплексного аналізу матеріалів лабораторних петроелектричних досліджень побудовано ряд кореляційних залежностей: відносного електричного опору P від коефіцієнта пористості k_n та параметра збільшення електричного опору P_n від коефіцієнта водонасиченості k_b .

Модуль показника степеня n (ступінь гідрофільності або гідрофобності поверхні зерен колектора) у рівняннях типу $P_n = b \cdot k_b^{-n}$ зростає в ряду: алевроліти, $n = 1,354$ (100 %), – пісковики, $n = 1,561$ (115 %), – вапняки, $n = 1,718$ (127 %). Значення параметра b практично однакове для всіх типів досліджених порід і змінюється від 1,018 до 1,029.

Аналіз лабораторних петроакустичних матеріалів засвідчив наявність значних варіацій швидкості й інтервального часу поширення пружних хвиль матриці твердого скелета, що вказує на зміни літологічного складу досліджених порід. Побудована кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості k_n та інтервальним часом dt .

Слід зазначити, що петрофізичні дослідження займають важливе місце у комплексі геологічних досліджень, особливо під час вивчення фізичних властивостей гірських порід з метою встановлен-

ня їх складу, структури і стану для вирішення різноманітних завдань при пошуках та розвідці родовищ корисних копалин, зокрема у нафтогазовій геології.

1. *Вишва С.А.* Петроелектричні дослідження керна свердловини Чорноморського шельфу / С.А. Вишва, М.В. Рева, А.П. Гожик, В.І. Онищук, І.І. Онищук // Вісн. Київ. ун-ту. Геологія. – 2008. – № 44. – С. 4–8.
2. *Вишва С.А.* Петроелектричні дослідження керна складнобудованих порід-колекторів / С.А. Вишва, М.В. Рева, А.П. Гожик, В.І. Онищук, І.І. Онищук // Там само. – 2010. – № 50. – С. 4–7.
3. *Вишва С.А.* Петроелектрична модель порід-колекторів Західношебелінського газоконденсатного родовища / Д.І. Онищук, В.І. Онищук // Там само. – 2012. – № 57. – С. 13–16.
4. *Дахнов В.Н.* Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения пород. – М.: Недра, 1975. – 343 с.
5. *Дортман Н.Б.* Петрофизика: Справочник. Ч.1. – М.: Недра, 1992. – 391 с.
6. *Дортман Н.Б.* Петрофизика: Справочник. Ч.2. – М.: Недра, 1992. – 304 с.
7. *Коефіцієнт* залишкового водонасичення гірських порід: ДСТУ 41-00032626-00-025-2000. – К.: Мінеко-ресурсів України. – 2001. – 17 с.
8. *Лукин А.Е.* Сланцевый газ и перспективы его добычи в Украине. Ст. 1. Современное состояние проблемы сланцевого газа (в свете опыта освоения его ресурсов в США) // Геол. журн. – 2010. – № 3. – С. 17–32.
9. *Лукин А.Е.* Сланцевый газ и перспективы его добычи в Украине. Ст. 2. Черносланцевые комплексы Украины и перспективы их газоносности в Вольтыно-Подольи и Северо-Западном Причерноморье // Там же. – 2010. – № 4. – С. 7–24.
10. *Лукин А.Е.* Перспективы сланцевой газоносности Днепровско-Донецкого авлакогена // Там же. – 2011. – № 1. – С. 21–41.
11. *Пархоменко Э.И.* Электрические свойства горных пород. – М.: Наука, 1965. – 164 с.
12. *Перспективи* газоносності сланцевих відкладів Дніпровсько-Донецької западини / Михайлов В.А., Огар В.В., Гладун В.В., Чепіль П.М., Зейкан О.Ю. // Геолог України. – 2011. – № 2. – С. 51–58.
13. *Перспективи* відкриття в Україні нетрадиційних родовищ нафти, пов'язаних зі сланцевими і флішевими відкладами / Михайлов В.А., Гладун В.В., Зейкан О.Ю., Чепіль П.М. // Нафтогаз. пром-сть. – 2012. – № 1. – С. 55–59.
14. *Породы* горные. Методы определения коллекторских свойств. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации: ГОСТ 26450.2-85. – М.: Мингео СССР, 1985. – 18 с.
15. *Продайвода Г.Т.* Акустика текстур гірських порід. – К.: ВГЛ “Обрії”, 2004. – 144 с.
16. *Физические* свойства горных пород и полезных ископаемых: Справочник геофизика. – М.: Недра, 1984. – 455 с.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
E-mail: boenerges@ukr.net

Надійшла до редакції 30.05.2013 р.

С.А. Вышва, В.А. Михайлов, Д.И. Онищук, И.И. Онищук

ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ НЕТРАДИЦИОННЫХ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ ЮЖНОГО НЕФТЕГАЗОВОГО РЕГИОНА

Рассматриваются особенности методики и результаты петрофизических исследований сложнопостроенных коллекторов. Показана связь петрофизических параметров с емкостными свойствами песчаников, алевролитов и известняков из перспективных на углеводороды интервалов скважин Южного нефтегазового региона. Построены корреляционные зависимости петрофизических параметров от емкостных свойств исследованных пород.

Ключевые слова: терригенные коллекторы, коэффициент пористости, коэффициент проницаемости, удельное электрическое сопротивление, интервальное время.

S.A. Vyshva, V.A. Myhailov, D.I. Onyshchuk, I.I. Onyshchuk

PETROPHYSICAL PARAMETERS OF UNCONVENTIONAL TYPES OF RESERVOIR ROCKS FROM SOUTHERN OIL-AND-GAS REGION

Considered here are the features of the technique and the results of petrophysical investigations in studying complex-build terrigenous reservoirs. The authors show the results of evaluating petrophysical parameters and their link with capacitive properties of sandstones, siltstones and limestones from prospective for hydrocarbons wells intervals of Southern oil-and-gas region. Correlation dependences of petrophysical parameters from capacitive properties of the investigated rocks are built.

Keywords: terrigenous reservoirs, porosity factor, permeability index, resistivity, interval time.