

Петрофізичні параметри порід, перспективних на сланцевий газ (ділянки східного сектору Дніпровсько-Донецької западини)

© С. А. Вижва, В. А. Михайлов, Д. І. Онищук, І. І. Онищук, 2014

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Надійшла 23 жовтня 2012 р.

Представлено членом редколегії М. І. Орлюком

Рассматриваются особенности методики и результаты петрофизических исследований при изучении сложнопостроенных терригенных коллекторов. Приведены результаты определения петрофизических параметров и их связь с емкостными свойствами песчаников, алевролитов и аргиллитов из перспективных на сланцевый газ интервалов скважин восточного сектора Днепро-Донецкой впадины. Построены корреляционные зависимости петрофизических параметров от емкостных свойств исследованных пород.

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

Petrophysical parameters of rocks from the areas of eastern sector of the Dnieper-Donets depression promising for shale gas

© S.A. Vyzhva, V.A. Mykhaylov, D.I. Onyshchuk, I.I. Onyshchuk, 2014

Consideration is given to feature the method and results of petrophysical investigations by studying complex-built terrigenous reservoirs. Results of evaluation petrophysical parameters and their link with capacitive properties of sandstones, siltstone and mudstones from prospective for shale gas wells intervals of eastern sector of DDB are shown. Correlation dependences of petrophysical parameters from capacitive properties of investigated rocks have been plotted.

Key words: reservoir rocks, porosity factor, permeability index, resistivity, interval time.

Вступ. Глинисті сланці — найпоширеніший вид терригенних осадових порід. Вони відіграють значну роль як покришки над колекторами, що містять вуглеводні. Можливість видобутку газу з глинистих сланців відома давно. Ці відклади, за рідкісним винятком, не становили інтересу як можливе промислове джерело газу, хоча в деяких районах глинисті сланці містять значну кількість органічної речовини і газу. Останнім часом поєднання економічних умов, розширення геологічних знань і розроб-

ка новітніх технологій видобутку змінили ставлення до цих відкладів. Стало зрозуміло, що з багатих органічною речовиною глинистих сланців можна добувати газ у великих обсягах і з економічно прийнятною за сучасних умов собівартістю. Розробка цих родовищ, зважаючи на її високу вартість, стала доцільною лише останнім часом, коли технологія видобутку газу суттєво вдосконалена, а світова економічна кон'юнктура зробила прийнятними значні витрати на застосування цієї технології.

Газоносні глинисті сланці поширені практично в усіх континентах, у зв'язку з чим слід очікувати повсюдної розробки цих відкладів. На цей час у різних країнах, особливо в США і Канаді, проводять інтенсивні роботи, спрямовані на створення ефективних методів виділення і оцінки газоносних глинистих сланців і на підвищення продуктивності свердловин. Інтерес до цього джерела газу виявляють в Італії, Норвегії, Польщі, Румунії, останнім часом в Україні та в багатьох інших країнах.

Ключовими складовими цієї технології є буріння горизонтальних свердловин, орієнтованих в напрямку, перпендикулярному до мінімального горизонтального напруження порід, і проведення гідророзриву в продуктивному інтервалі розрізу. Суттєву частину технології складають геофізичні та петрофізичні дослідження, а також математичне моделювання, на основі яких визначають напрямки горизонтального стовбура свердловини гідророзриву і його параметри.

На сучасному етапі проблема пошуків і вивчення нетрадиційних джерел вуглеводнів (сланцевий газ, газ ущільнених колекторів та газ вугільних родовищ) на території України набуває все більшої актуальності. Для оцінки перспективності на сланцевий газ геологічних структур і комплексів крім економічних та геолого-геометричних параметрів, вмісту органічної речовини та ступеня термічної переробки порід важливе значення мають петрофізичні параметри гірських порід. Ці дані необхідні під час інтерпретації матеріалів геофізичних досліджень пошуково-розвідувальних свердловин, а також оцінки параметрів гідророзриву пласта. Слід зазначити, що петрофізичні дослідження донедавна були спрямовані переважно на вивчення порід-колекторів традиційних джерел вуглеводнів і на цьому етапі петрофізичні параметри порід-колекторів сланцевого газу слабо вивчені або не вивчені.

Метою досліджень була оцінка петрофізичних параметрів порід-колекторів нетрадиційних джерел вуглеводнів перспективних ділянок східного сектору Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) як основи комплексного аналізу їх фізичних властивостей.

Зв'язки між ємнісно-фільтраційними характеристиками і даними свердловинних та польових геофізичних методів є доволі складними і потребують ретельного вивчення. Основою для визначення цих зв'язків є комплекс лабораторних петрофізичних досліджень.

Одними з найінформативніших параметрів для визначення петрофізичних властивостей

гірських порід є питомий електричний опір і швидкість поширення пружних хвиль. Питомий електричний опір залежить від: речовинного складу і текстури породи; структури ємнісного простору; її нафто-, газо- та водонасиченості; коефіцієнта пористості; мінералізації пластових вод; температури і тиску [Пархоменко, 1965; Дахнов, 1975; Вижва та ін., 2008].

Питомий електричний опір і швидкість поширення пружних хвиль порід-колекторів визначають з метою уточнення меж їх зміни для окремих типів і груп порід; виділення окремих стратиграфічних горизонтів, розрізів і фацій; встановлення характеру залежності їх від мінерального складу, структури порового простору, співвідношення фаз речовини; виявлення характеру зміни електричного опору та швидкості поширення пружних хвиль в залежності від ступеню епігенетичних перетворень 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 та мінеральним складом зразків керна. За результатами петроелектричних досліджень до і після екстрагування зразків та після їх насичення моделлю пластової рідини можна оцінити вплив солей і пустот на цей параметр. Відомості, одержані в результаті лабораторних досліджень зміни питомого електричного опору порід, використовують під час інтерпретації результатів електрометричних методів досліджень свердловин та польової електророзвідки, а зміни швидкості поширення пружних хвиль — під час інтерпретації результатів акустичних методів досліджень свердловин і польової сейсморозвідки.

В статті наведено результати комплексних досліджень петрофізичних властивостей 67 зразків керна свердловин східного сектору ДДЗ на площах: Артемівській (св. Артемівська-1, інтервал 3559—4020 м; Дробишівська-4, інтервал 3218—3890 м; Дробишівська-10, інтервал 3861—4165 м; Святогірська-10, інтервал 3751—4012 м), Гашинівській (св. Гашинівська-3, інтервал 3355—3604 м), Євгенівській (св. Євгенівська-1, інтервал 2224—2684 м; Євгенівська-4, інтервал 2482—3062 м; Євгенівська-6, інтервал 2042—2049 м; Євгенівська-8, інтервал 2232—2324 м; Євгенівська-20, інтервал 1101—1117 м; Дружелюбівська-104, інтервал 2852—2857 м), Куличихинській (св. Куличихинська-30, інтервал 3070—3175 м), Західношебелинській (св. За-

хідношебелинська-702, інтервал 4390—5593 м; Західношебелинська-701, інтервал 4929—5380 м), Південноколомацькій (св. Південноколомацька-32, інтервал 5476—5588 м), Зачепилівській (св. Зачепилівська-90, інтервал 971—983 м; Зачепилівська-100, інтервал 1270—1758 м). Порооди з досліджених інтервалів свердловин представлені переважно аргілітами, алевролітами, сланцями та різнозернистими пісковиками карбону.

Експериментальні дослідження. Комплекс експериментальних лабораторних досліджень включав визначення густини досліджених порід (сухих і насичених розчином NaCl — моделлю пластової води); відкритої пористості (методами насичення азотом та розчином NaCl); коефіцієнта залишкового водонасичення; проникності (методом стаціонарної фільтрації азоту); інтервального часу (швидкості поширення поздовжніх пружних хвиль) та питомого електричного опору (в різному стані насичення моделлю пластовою водою).

Об'ємну густину досліджених порід у сухому стані визначали зважуванням і за геометричними розмірами спеціальних лабораторних зразків, а насичених зразків — методом гідростатичного зважування за стандартною методикою [Дортман, 1984, 1992 б]. 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 за їх центрифугування на центрифугі ОС-6М. Обертову швидкість ротора центрифуги змінювали від 1000 до 6000 об/хв з кроком 1000 об/хв, а тиск витіснення — від 0,2 до 1 МПа [ДСТУ 41-00032626-00-025-2000, 2001].

Коефіцієнт проникності зразків керна експериментально визначали методом стаціонарної фільтрації азоту за допомогою спеціально розробленої установки [ГОСТ 26450.2-85, 1985]. Проведено два цикли вимірювання після екстрагування зразків у хлороформі та спиртобензольній суміші.

Лабораторні електрометричні вимірювання сухих зразків керна виконані за температури 20 °С за допомогою цифрового тераомметра С.А.6547, який дає змогу здійснювати високо-

точні 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 дає змогу визначати електричний опір з підвищеною точністю від 10^{-6} до 10^{12} Ом у діапазоні частот 0 Гц — 100 кГц. Циліндричні зразки під час вимірювання вставляли в спеціальний кернотримач з електродами, що не поляризуються [Вижва та ін., 2008, 2010, 2012].

З метою встановлення залежності петроелектричних параметрів від ступеня водонасиченості порід у процесі експериментальних лабораторних досліджень виконано серію електрометричних вимірювань, що дало змогу побудувати кореляційні залежності між коефіцієнтом водонасичення (k_v) і параметром насичення (P_H).

Швидкості 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 застосовано імпульсно-фазовий ультразвуковий метод [Продайвода, 2004]. Ультразвукові дослідження зразків проведено за різних станів (після екстрагування, за повного насичення гасом і розчином NaCl). Швидкість поширення поздовжніх хвиль вимірювали на зразках, що були орієнтовані вздовж нашарування.

Аналіз даних. За результатами лабораторних петрофізичних досліджень встановлено, що об'ємна густина сухих зразків змінюється у досить широких межах: від 1761 (чорний сланець, Зачепилівська площа) до 2977 кг/м³ (аргіліт чорний, Євгенівська площа), середнє значення — 2573 кг/м³. Широкий діапазон значень об'ємної густини свідчить про мінливість літологічного складу зразків керна та їх пористості.

В разі насичення зразків розчином NaCl з мінералізацією 180 г/л (модель пластового розчину) об'ємна густина досліджених порід змінюється від 1904 (чорний сланець, Зачепилівська площа) до 2995 кг/м³ (аргіліт чорний, Євгенівська площа), середнє значення — 2621 кг/м³. Межі змін цього параметра залежно від різновидів порід для досліджених площ наведено в табл. 1. Середня відносна похибка визначень коефіцієнта пористості — 1,1 %.

Пустотний простір породи характеризується пористістю, а здатність породи пропускати через себе флюїди — проникністю. Перш ніж відповісти на питання, що стосуються типів флюїдів, їх кількості, швидкості руху або видобут-

Т а б л и ц я 1. Межі змін фільтраційно-ємнісних параметрів досліджених порід ділянок східного сектору Дніпровсько-Донецької западини

Порода	Вік	Значення параметра	Густина, кг/м ³		Відкрита пористість, %		Проникність, фм ²	Коефіцієнт залишкової водонасиченості
			сухі	насичені	азот	розчин		
Артемівська площа								
Пісковик	C ₃ ¹ —C _{2m}	min	2563	2609	1,4	1,0	0,001	0,68
		max	2678	2688	4,9	4,1	0,574	0,83
		середнє	2621	2648	3,0	2,4	0,114	0,77
Аргіліт	C ₃ ¹ —C _{2m}	min	2608	2660	1,8	1,2	0,073	0,62
		max	2782	2797	6,3	5,5	0,262	0,90
		середнє	2677	2700	3,0	2,4	0,199	0,80
Євгенівська площа								
Пісковик	C _{1s} —C _{1v}	min	2633	2669	—	3,4	—	—
		max	2739	2774	—	3,5	—	—
		середнє	2686	2722	4,0	3,5	—	0,77
Аргіліт	C _{1s} —C _{1v}	min	2068	2230	2,6	1,4	0,016	0,50
		max	2977	2995	10,8	9,9	11,187	0,77
		середнє	2554	2609	5,0	5,3	3,371	0,69
Гашинівська площа								
Аргіліт	C _{1v} —D _{3fr}	min	2541	2558	2,7	0,6	0,007	—
		max	2705	2716	4,4	3,9	0,724	—
		середнє	2595	2612	3,6	1,7	0,366	0,75
Зачепилівська площа								
Чорний сланець	C _{1t} —C _{1v}	min	1761	1904	—	12,7	—	—
		max	1887	2063	—	13,5	—	—
		середнє	1824	1984	—	13,1	—	—
Аргіліт	C _{1s} —C _{1v}	min	2190	2389	—	13,1	—	—
		max	2205	2396	—	13,9	—	—
		середнє	2198	2393	—	13,5	—	—
Алевроліт	C _{1t} —C _{1v}	min	2395	2459	4,5	3,5	0,007	0,73
		max	2605	2644	11,8	10,6	0,445	0,85
		середнє	2509	2574	7,2	6,0	0,165	0,79
Західношебелінська площа								
Алевроліт	C _{2m} —C _{3is}	min	2535	2587	1,9	1,3	0,026	0,67
		max	2612	2645	7,0	4,8	3,217	0,85
		середнє	2588	2616	3,6	2,6	1,138	0,79
Аргіліт	C _{2m} —C _{2b}	min	2582	2606	1,6	1,1	0,001	—
		max	2611	2623	2,3	2,2	0,009	—
		середнє	2597	2615	2,0	1,6	0,005	—
Куличихинська площа								
Аргіліт	C _{1t} —C _{1v}	min	2587	2529	8,1	5,8	0,347	—
		max	2655	2784	11,0	10,2	4,957	—
		середнє	2621	2662	9,6	8,0	2,652	0,75
Південноколомацька площа								
Аргіліт	C _{1s}	min	2660	2676	2,6	1,6	0,023	0,63
		max	2697	2772	3,5	2,3	8,052	0,73
		середнє	2673	2713	3,1	2,0	3,958	0,66

ку цих флюїдів, слід визначити ці дві властивості і зуміти їх оцінити. Інші важливі властивості порід-колекторів — структура та вміст води, що залежать від капілярного тиску, а також звивистість порових каналів.

Структуру осадових порід значною мірою визначають за формою і обкоченістю зерен, їх розмірами, сортуванням, орієнтацією і упаковкою, а також хімічним складом зерен. Комплексне вивчення цих параметрів дає змогу отримати інформацію про діagenетичні і катагенетичні процеси і механізми, які діяли під час транспортування і відкладення осадового матеріалу, ущільнення та деформації осадів. У деяких випадках за структурою породи можна визначити її пористість і проникність. Наприклад, дрібнозернисті пісковики зі слабко відсортованими необкоченими зернами зазвичай мають меншу пористість, ніж пісковики, складені великими, добре відсортованими зернами. Зміни проникності можна прогнозувати за зміненням розміру і форми часточок, а також розподілом порових каналів у породі.

Пористість породи — досить важливий параметр, тому що визначає ємність колектора — властивість породи містити флюїди (нафту, газ і воду). Пористість гірської породи визначають за сукупністю порожнин у мінеральному скелеті породи. Розрізняють загальну, відкриту та ефективну пористість [Дортман, 1992а, б]. Коефіцієнт загальної пористості k_{Π} дорівнює відношенню об'єму всіх пор V_{Π} до об'єму сухого зразка V_c . Від структури і текстури порід залежить структура порового простору, яку можна схарактеризувати відкритою і ефективною пористістю та параметром форматів α_{Π} різних видів пористості.

Коефіцієнт відкритої пористості визначено ваговим методом за насичення циліндричних зразків керна моделлю пластової рідини. Він змінюється від 1 (пісковик, Артемівська площа) до 13,9 % (аргіліт, Зачепилівська площа), середнє значення 4,2 %. Коефіцієнт відкритої пористості "за азотом" визначено за допомогою насичення циліндричних зразків азотом під тиском 2,5 кгс/см² (1 кгс/см² \approx 9,8 · 10⁴ Па), його значення змінюються від 1,4 (пісковик, Артемівська площа) до 14,7 % (аргіліт, Зачепилівська площа), середнє значення 4,7 %. 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 газоволюмет-

ричним, має вигляд

$$k_{\Pi, \text{вода}} = 0,909 k_{\Pi, \text{азот}} - 0,475$$

при $R^2 = 0,969$,

де $k_{\Pi, \text{азот}}$ — відкрита пористість, визначена за насиченням азотом; $k_{\Pi, \text{вода}}$ — відкрита пористість, визначена за насиченням водою з мінералізацією 180 г/л.

За даними табл. 1, більшість досліджених порід належить до IV—V класів колекторів (пористість низька і дуже низька) [Дахнов, 1975]. Залежно від літологічного складу за значеннями коефіцієнта пористості досліджені породи віднесено до таких класів колекторів: аргіліти (пористість 1,1—13,9 % за середнього значення 5,9 %) — IV і V (низька та дуже низька пористість); алевроліти (пористість 1,3—10,6 % за середнього значення 4,3 %) — IV і V (низька та дуже низька пористість); пісковики (пористість 1,0—4,1 % за середнього значення 3,5 %) — V (дуже низька пористість).

Властивість породи пропускати флюїди по сполучених порах називають проникністю. Очевидно, що непористі породи не мають проникності. Проникність породи залежить від її ефективної пористості, тобто від розміру зерен породи, їхньої форми, розподілу зерен за розмірами (сортування), їх упаковки, а також ступеня консолідації та цементації. Тип глинистого або іншого цементувального матеріалу між піщаними зернами також впливає на проникність, 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.

Проникність k характеризує абсолютну проникність, якщо порода на 100 % насичена одним флюїдом (або фазою), таким як газ, нафта або вода. Якщо порода містить більше одного флюїду, проникність для кожного з них ха-

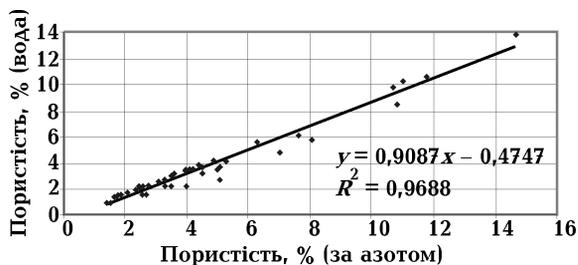


Рис. 1. Кореляційна залежність між пористістю порід, визначена способом гідростатичного зважування та газоволюметричним методом.

рактизується ефективною проникністю (при цьому k_H, k_G, k_B — ефективні проникності для нафти, газу, води відповідно). Під час руху по порових каналах пластові флюїди взаємодіють, заважаючи один одному, тому сума ефективних проникностей усіх трьох фаз завжди менша за абсолютну проникність. Якщо порода містить більше ніж один флюїд, відношення ефективної проникності для будь-якої фази до абсолютної проникності породи називають відносною проникністю (k_r) для цієї фази. Наприклад, відносні проникності для нафти, газу та води будуть $k_{rH} = k_H/k, k_{rG} = k_G/k, k_{rB} = k_B/k$ відповідно.

Нафтові і газові колектори можуть мати первинну проникність, яка відома також як проникність матриці (мінерального каркаса) породи, і вторинну проникність. Проникність матриці утворюється під час відкладення і літифікації (консолідації) осадових порід. Вторинна проникність є результатом зміни матриці породи внаслідок ущільнення, цементації, утворення тріщин і вилуговування. Ущільнення і цементація зазвичай зменшують проникність, тоді як утворення тріщин і вилуговування мають тенденцію збільшувати їх. У деяких породах, особливо низькопористих карбонатах та аргілітах, саме через вторинну проникність відбувається основна міграція флюїдів.

Проникність порід-колекторів нафти і газу може змінюватися в діапазоні від 0,1 до 1000 фм² або більше. Якість колектору пов'язана з його проникністю, розрізняють проникність низьку, $k < 1$ фм²; задовільну, $1 \text{ фм}^2 < k < 10 \text{ фм}^2$; середню, $10 \text{ фм}^2 < k < 50 \text{ фм}^2$; високу, $50 \text{ фм}^2 < k < 250 \text{ фм}^2$; дуже високу, $k > 250 \text{ фм}^2$. Колектори з проникністю $< 1 \text{ фм}^2$ вважають щільними. Низьку проникність зазвичай мають аргіліти, алевроліти, щільні газоносні пісковики і матриця вапняків. Методи інтенсифікації — гідророзрив і кислотна обробка пласта, підвищують проникність порід і дають змогу вести видобуток із таких слабопроникних колекторів, які раніше вважали некондиційними.

За результатами вимірювань коефіцієнта абсолютної проникності циліндричних зразків керн методом стаціонарної фільтрації азоту [ГОСТ 26450.2-85, 1985] встановлено, що його значення змінюються від 0,001 (пісковик, Артемівська площа; аргіліт, Західношебелінська площа) до 11,2 фм² (аргіліт, Євгенівська площа) за середнього значення 1,62 фм² (див. табл. 1). Середня відносна похибка визначень коефіцієнта проникності 2%.

За значеннями коефіцієнта проникності досліджені породи належать до IV—V класів ко-

лекторів [Дахнов, 1975]. За даними табл. 1, за цим показником з урахуванням літологічного складу досліджені породи віднесено до таких класів колекторів: аргіліти (проникність 0,001—11,2 фм² за середнього значення 1,759 фм²) — IV і V (проникність низька та дуже низька); алевроліти (проникність 0,007—3,217 фм² за середнього значення 0,652 фм²) — IV і V (проникність низька та дуже низька); пісковики (проникність 0,001—0,574 фм² за середнього значення 0,114 фм²) — V (проникність дуже низька).

Відносний ступінь заповнення пор тим чи іншим флюїдом — доволі важлива властивість породи і характеризується флюїдонасиченістю, яку визначають як частку загального об'єму, що зайнята деяким флюїдом — нафтою, газом або водою, до загального об'єму. В ідеалі, через різницю густини пластових флюїдів поклад вуглеводнів формується таким чином, що в пласті теригенних порід залягають (згори вниз): спочатку газ, потім нафта, а потім вода. Однак реліктова (залишкова) вода має включення майже повсюдно в межах покладу вуглеводнів. Реліктова вода — це морська вода, що опинилася в поровому просторі осаду в процесі його відкладення і літифікації набагато раніше того часу, коли нафта мігрувала в породу-колектор. Крім густини на розподіл цих трьох флюїдів у межах покладу впливають змочуваність і міжфазний поверхневий натяг, що змінюють первинну картину.

Кількість залишкової води, що наявна у поровому просторі, змінюється від 100 % нижче нафтової зони 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, тобто залишкова водонасиченість. Величина і висота перехідної зони залежать від розміру пор і структури породи. Високі значення вказують на малі розміри пор. Перехідна зона відповідає зоні змінної водонасиченості.

Коефіцієнт залишкового водонасичення для досліджених порід змінюється від 0,5 (аргіліт, Євгенівська площа) до 0,9 (аргіліт, Артемівська площа) за середнього значення 0,76. Дані стосовно різних площ і порід наведено в табл. 1.

Відмінність гірських порід за електричними властивостями та залежність останніх від різних фізико-геологічних факторів складають фізичну основу застосування методів електророзвідки та електрокаротажу. Результати вивчення електричних властивостей широко використовують під час петрофізичних досліджень,

геохімічних пошуків, геофізичних досліджень свердловин, вирішення гідрогеологічних та інженерно-геологічних завдань.

Електропровідність речовин 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 долають заряджені частинки, обмежена), ємнісний (є результатом поляризації зміщення та зарядження геометричної міжелектродної ємності). Електричний струм, що виникає в природних системах, є результуючою усіх указаних вище струмів. Опір електричному струму зумовлений хаотичним (тепловим) переміщенням заряджених частинок і 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 під час як польових, так і лабораторних досліджень. Він є досить важливою характеристикою породи. Як уже зазначалося, в гірській породі на цей параметр впливає низка факторів, що зумовлює його змінення в широких межах. Електричний опір речовини кількісно оцінюють величиною питомого електричного опору ($\text{Ом} \cdot \text{м}$), яка характеризує протидію одиниці об'єму речовини (гірських порід, вод та ін.) проходженню електричного струму. Питомий електричний опір залежить від речовинного складу породи, температури і тиску, тобто умов його вимірів [Дахнов, 1975; Дортман, 1992а, б].

За результатами лабораторних вимірювань встановлено, що питомий електричний опір, вимірний на сухих екстрагованих зразках (питомий електричний опір мінерального скелета), змінюється від 98 (чорний піритизований аргіліт, Південноколомаська площа) до 1 585 600 $\text{Ом} \cdot \text{м}$ (кварцовий пісковик з детритом, Гашинівська площа) за середнього значення 107 640 $\text{Ом} \cdot \text{м}$ (табл. 2). Значні варіації значень параметра пояснюються наявністю неоднорідностей в текстурі порід (глинистих і піщанистих прошарків та їх невпорядкованістю, а також вуглефікацією та піритизацією порід).

Відносно низьким питомим електричним опором мінерального скелета ($< 10\,000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) характеризуються в основному аргіліти та алев-

роліти чорні вуглефіковані та піритизовані Артемівської, Євгенівської, Зачепилівської, Гашинівської, Західношебелинської, Куличихинської та Південноколомаської площ. Понижений електричний опір цих порід пов'язаний з підвищеним вмістом глинистої компоненти, вуглефікацією та піритизацією.

Підвищені і високі питомі електричні опори мінерального скелета ($> 100\,000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) досліджених порід встановлено для грубозернистого пісковика Артемівської та кварцового пісковика з детритом Гашинівської площ; перешарування аргілітів і алевролітів Євгенівської площі, чорної бітумінозної брекчії Куличихинської площі.

Згідно з аналізом результатів лабораторних електрометричних досліджень питомого електричного опору порід, насичених моделлю пластового розчину NaCl , цей параметр змінюється від 1 (чорна бітуміозна надсол'ява брекчія, Куличихинська ділянка) до 33,2 $\text{Ом} \cdot \text{м}$ (аргіліт темно-сірий, Західношебелинська площа) за середнього значення 11,6 $\text{Ом} \cdot \text{м}$.

Низькими питомими електричними опорами порід, насичених моделлю пластового розчину NaCl ($< 8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), характеризуються деякі різновиди: пісковиків Артемівської площі; аргілітів, алевролітів чорних, вуглефікованих, піритизованих, а також їх перешарувань Артемівської, Євгенівської, Західношебелинської, Зачепилівської, Куличихинської та Південноколомаської площ. Понижений електричний опір цих порід спричинений вуглефікацією, піритизацією та підвищеним вмістом глинистої компоненти.

Підвищені питомі електричні опори порід насичених моделлю пластового розчину NaCl ($> 15 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) зафіксовані у деяких різновидів пісковиків Артемівської, Євгенівської площ, а також аргілітів Артемівської, Гашинівської, Західношебелинської та Південноколомаської площ. Підвищений електричний опір цих порід пов'язаний відносно зниженим вмістом глинистої компоненти.

Середня відносна похибка визначень питомого електричного опору — 2,3 %.

У результаті лабораторних електрометричних досліджень визначено відносний електричний опір та його зміни для різних типів порід досліджених ділянок. Він змінюється від 7 (сірий аргіліт з органічною речовиною, Зачепилівська площа) до 405 (аргіліт темно-сірий, Західношебелинська площа) за середнього значення 113.

Низькими значеннями відносного електричного опору (< 80) характеризуються деякі різ-

Т а б л и ц я 2. Межі змін електричних та пружних параметрів досліджених порід східного сектору Дніпровсько-Донецької западини

Порода	Вік	Значення параметра	Питомий електричний опір, Ом · м		Відносний електричний опір	Швидкість поширення пружних хвиль, м/с		Інтервальний час, мкс/м	
			сухі	насічені		сухі	насічені	сухі	насічені
Артемівська площа									
Пісковик	C ₃ ¹ —C ₂ m	min	5764	4,7	59	3694	4511	208	186
		max	717 138	30,3	383	4813	5385	271	222
		середнє	191 678	14,7	186	4166	4937	243	203
Аргіліт	C ₃ ¹ —C ₂ m	min	1744	4,4	56	3707	4507	187	182
		max	10 313	23,1	292	5349	5499	270	222
		середнє	6911	12,2	131	4832	5091	209	197
Євгенівська площа									
Пісковик	C _{1s} —C _{1v}	min	17 889	13,2	91	4161	4914	224	196
		max	32 354	16,5	114	4468	5107	240	204
		середнє	25 122	14,9	102	4315	5011	232	200
Аргіліт	C _{1s} —C _{1v}	min	8775	2,2	26	2874	3628	199	177
		max	209 175	11,8	139	5037	5645	348	276
		середнє	70 063	7,5	84	4162	4891	246	209
Гашинівська площа									
Аргіліт	C _{1v} —D _{3fr}	min	6943	9,7	123	4232	5148	193	184
		max	1 585 582	23,0	271	5168	5442	236	194
		середнє	796 263	16,4	197	4700	5295	215	189
Зачепилівська площа									
Алевроліт	C _{1t} —C _{1v}	min	6201	1,9	23	3093	3352	211	210
		max	31 045	6,3	74	4731	4754	323	298
		середнє	17 019	4,6	54	3971	4198	258	242
Західношебелінська площа									
Алевроліт	C _{2m} —C _{3is}	min	4447	6,4	75	3810	4336	189	164
		max	74 400	14,7	179	4921	5215	242	231
		середнє	36 891	10,0	120	4682	4984	216	202
Аргіліт	C _{2m} —C _{2b}	min	536 394	8,9	108	3202	4357	199	190
		max	1 150 800	33,2	405	5030	5254	312	230
		середнє	843 597	21,1	257	4116	4806	256	210
Куличихинська площа									
Аргіліт	C _{1t} —C _{1v}	min	8974	1,0	12	2971	4250	218	197
		max	171 903	2,9	34	4578	5074	337	235
		середнє	90 439	1,9	23	3759	4594	273	219
Південноколомаська площа									
Аргіліт	C _{1s}	min	98	7,7	91	3288	3769	195	188
		max	5566	21,1	248	5126	5333	304	265
		середнє	3473	12,6	148	4335	4818	236	211

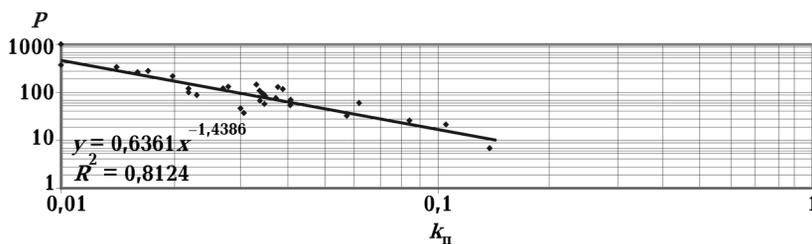


Рис. 2. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості (k_p) та відносним електричним опором (P) — рівняння Арчі — Дахнова.

новиди: пісковиків Артемівської площі; аргілітів, алевролітів чорних, вуглефікованих, піритизованих, а також їх перешарувань Артемівської, Євгенівської, Зачепилівської та Куличинської площ. Понижений електричний опір цих порід зумовлений вуглефікацією, піритизацією та підвищеним вмістом глинистої компоненти.

Підвищені значення відносного електричного опору (> 150) зафіксовані: у деяких різновидах пісковиків Артемівської площі, а також аргілітів Артемівської, Гашинівської, Західношебелинської та Південноколомацької площ. Підвищений відносний електричний опір цих порід викликаний відносно зниженою пористістю.

За матеріалами лабораторних досліджень побудована кореляційна залежність (рис. 2) між коефіцієнтом пористості (k_p) і відносним електричним опором (P). При цьому використані дані стосовно всіх вищеозначених свердловин. Слід зазначити, що дані різних свердловин досить добре узгоджуються.

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

$$P = 0,636 k_p^{-1,439} \text{ при } R^2 = 0,812.$$

У процесі експериментальних лабораторних досліджень встановлено залежності петрофізич-

них параметрів від ступеня водонасиченості порід. Водонасиченість порід змінювали центрифугуванням за допомогою центрифуги ОС-6М. Виконано серію електрометричних вимірювань. В результаті цих досліджень побудовані кореляційні залежності (рис. 3—5) між коефіцієнтом водонасичення (k_B) і параметром збільшення електричного опору (P_H) для основних літологічних типів досліджених порід — пісковиків, алевролітів та аргілітів (сланців). Параметр P_H визначали за формулою

$$P_H = \rho_{HВ} / \rho_{ПВ},$$

де $\rho_{HВ}$ — питомий електричний опір неповністю водонасичених порід; $\rho_{ПВ}$ — питомий електричний опір повністю водонасичених порід.

Згідно з аналізом отриманих даних, для пісковиків параметр збільшення електричного опору змінюється від 1 до 6,9 за середнього значення 2. Відповідний цьому коефіцієнт водонасичення змінюється від 0,695 до 1 за середнього значення 0,886. Для алевролітів діапазон зміни P_H становить від 1 до 12,1 за середнього значення 2,9, коефіцієнта водонасичення — від 0,674 до 1 за середнього значення 0,895. Для аргілітів і сланців P_H змінюється від 1 до 27,3 за середнього значення 4,6, коефіцієнта водонасичення — від 0,62 до 1,0 за середнього значення 0,869.

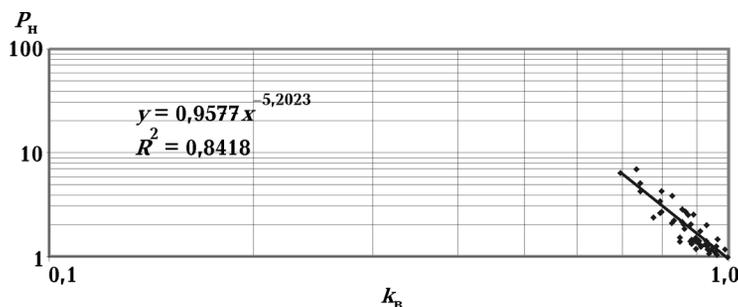


Рис. 3. Кореляційна залежність між коефіцієнтом водонасиченості (k_B) та коефіцієнтом збільшення опору (P_H) для пісковиків: $P_H = 0,958 k_B^{-5,202}$ при $R^2 = 0,842$.

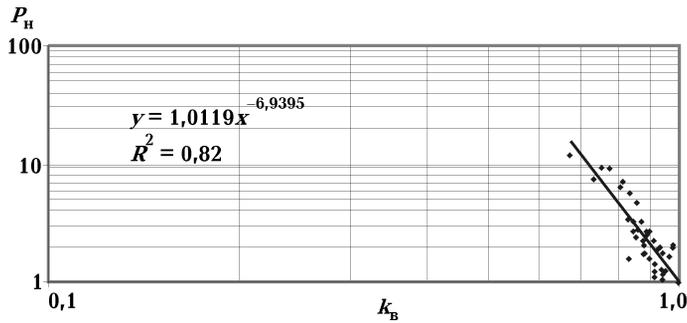


Рис. 4. Кореляційна залежність між коефіцієнтом водонасиченості (k_B) та коефіцієнтом збільшення опору (P_H) для алеволітів: $P_H = 1,012 k_B^{-6,94}$ при $R^2 = 0,82$.

Модуль показника степеня n у рівнянні типу $P_H = b k_B^{-n}$ закономірно зростає і становить: 5,202 — пісковики; 6,94 — алеволіти; 9,519 — аргіліти та сланці. На графіках цих залежностей (див. рис. 3—5) видно, що для алеволітів, аргілітів і сланців параметр збільшення електричного опору досить стрімко зростає. Це свідчить про розриви струмових ланцюжків (представлених мінералізованою водою в мікропорах) навіть за незначної втрати води, тобто про складний характер порового простору. Для пісковиків спостерігається більш пологий характер графіка, що вказує на порівняно простішу структуру порового простору, більший ступінь водовіддачі та крупніший формат пор.

Ультразвукові дослідження зразків було проведено за різних станів (після екстрагування, за повного насичення газом та розчином NaCl). За даними інверсії швидкості поширення поздовжніх хвиль встановлені значні варіації інтервального часу проходження пружних хвиль матриці твердого скелета, що зумовлено змінами літологічного складу зразків керна.

Швидкість поширення пружних хвиль, визначена для сухих зразків після екстрагуван-

ня, змінюється від 2874 (аргіліт вуглефікований, Євгенівська площа) до 5349 м/с (аргіліт з вуглистою речовиною, Дробишівська площа) за середнього значення 4309 м/с; у разі насичення зразків розчином NaCl — від 3359 (аргіліт мергелистий, Зачепилівська площа) до 5645 м/с (аргіліт з вуглистою речовиною, Євгенівська площа) за середнього значення 4491 м/с.

Інтервальный час, визначений для сухих зразків після екстрагування, змінюється від 187 до 348 мкс/м за середнього значення 232 мкс/м; у разі насичення зразків розчином NaCl — від 164 до 298 мкс/м за середнього значення 206 мкс/м.

Кореляційний зв'язок значень інтервального часу та коефіцієнта пористості, визначених в лабораторних умовах, має вигляд

$$dt = -2176,7 k_{II}^2 + 1530,4 k_{II} + 154,87$$

при $R^2 = 0,791$.

Для побудови графіка цієї залежності (рис. 6) використані дані щодо всіх вищезначених свердловин, які досить добре узгоджуються.

Аналіз матеріалів виконаних досліджень зміни швидкості поширення пружних хвиль під

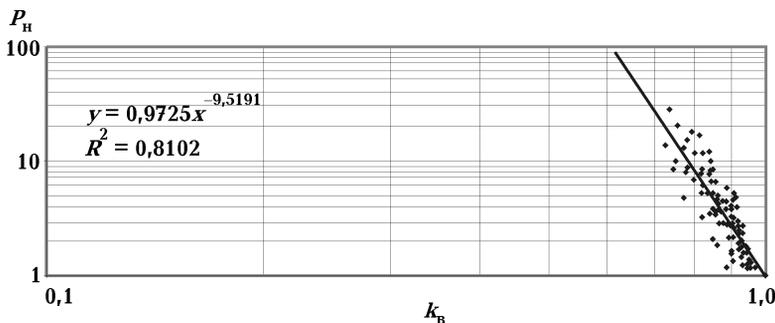


Рис. 5. Кореляційна залежність між коефіцієнтом водонасиченості (k_B) та коефіцієнтом збільшення опору (P_H) для аргілітів і сланців: $P_H = 0,973 k_B^{-9,519}$ при $R^2 = 0,81$.

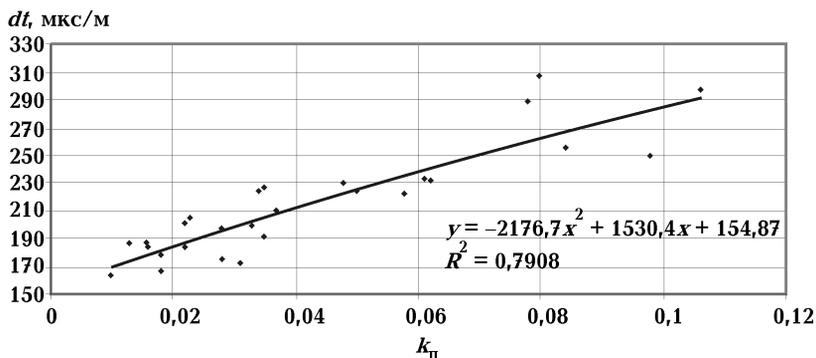


Рис. 6. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості (k_{Π}) та інтервальним часом (dt).

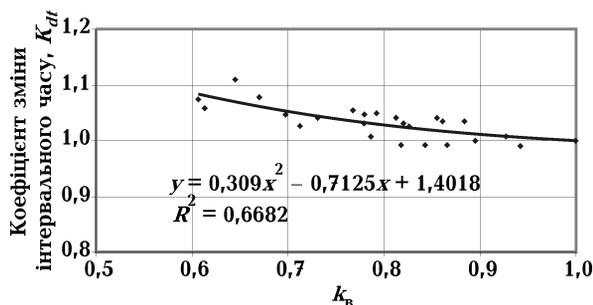


Рис. 7. Кореляційна залежність між коефіцієнтом водонасиченості ($k_{\text{В}}$) та коефіцієнтом зміни інтервального часу (K_{dt}) для пісковиків: $K_{dt} = 0,309 k_{\text{В}}^2 - 0,713 k_{\text{В}} + 1,402$ при $R^2 = 0,668$.

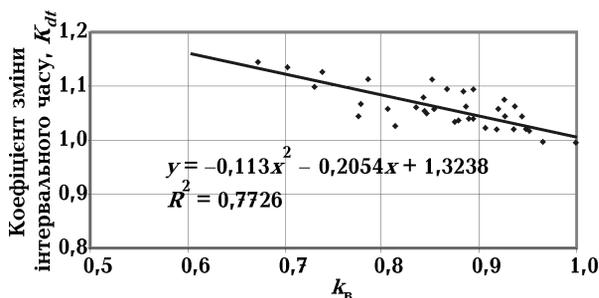


Рис. 8. Кореляційна залежність між коефіцієнтом водонасиченості ($k_{\text{В}}$) та коефіцієнтом зміни інтервального часу (K_{dt}) для алеволітів: $K_{dt} = -0,113 k_{\text{В}}^2 - 0,205 k_{\text{В}} + 1,324$ при $R^2 = 0,773$.

час відгонки моделі пластової води на центрифугі ОС-6М дав змогу встановити кореляційні залежності коефіцієнта зміни інтервального часу (k_{dt}) від коефіцієнта водонасичення ($k_{\text{В}}$) для різних літологічних типів досліджених порід (рис. 7—9).

Висновки. За даними петрографічних досліджень зразків ядра східного сектору ДДЗ встановлено, що за складом це аргіліти, алеволіти та пісковики. Трапляються прошарки глинистого матеріалу, включення органічної речовини, сидериту, вуглефікація та піритизація.

Мінливість літологічного складу та пористості зумовлює варіації об'ємної густини сухих зразків, яка змінюється від 1761 до 2977 кг/м³ за середнього значення 2573 кг/м³.

Відкрита пористість, визначена ваговим методом за насичення зразків ядра моделлю пластової води, змінюються від 1,0 до 13,9% за середнього значення 4,2%. Відкрита пористість "за азотом", яка визначена за допомогою насичення зразків азотом під тиском 2,5 кгс/см², дещо підвищена і змінюється від 1,4 до 14,7%

за середнього значення 4,7%. Зростання значень коефіцієнтів відкритої пористості за насичення азотом пояснюється прониканням газу в каплярні пори, в які не може потрапити рідина.

За коефіцієнтом пористості досліджені породи віднесено до таких класів колекторів:

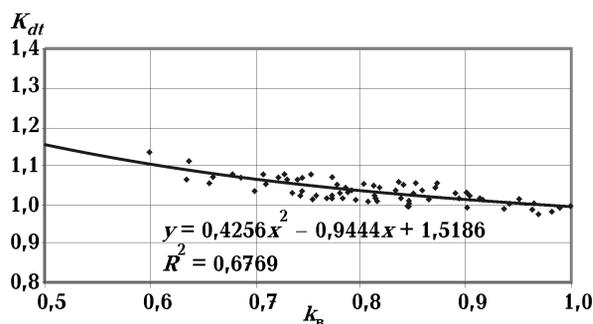


Рис. 9. Кореляційна залежність між коефіцієнтом водонасиченості ($k_{\text{В}}$) та коефіцієнтом зміни інтервального часу (K_{dt}) для аргілітів: $K_{dt} = 0,426 k_{\text{В}}^2 - 0,944 k_{\text{В}} + 1,519$ при $R^2 = 0,677$.

– аргіліти (пористість 1,1—13,9 %, середнє значення 5,9 %) та алевроліти (пористість 1,3—10,6 %, середнє значення 4,3 %) — IV та V (низька та дуже низька пористість);

– пісковики (пористість 1,0—4,1 %, середнє значення 3,5 %) — V (дуже низька пористість).

Коефіцієнт проникності зразків змінюється від 0,001 до 11,2 фм², середнє значення 1,62 фм². За цим показником досліджені породи віднесено до таких класів колекторів:

– аргіліти (проникність 0,001—11,2 фм², середнє значення 1,759 фм²) та алевроліти (проникність 0,007—3,217 фм², середнє значення 0,652 фм²) — IV та V (проникність низька та дуже низька);

– пісковики (проникність 0,001—0,574 фм², середнє значення 0,114 фм²) — V (проникність дуже низька).

Окремі зразки досліджених порід з дещо підвищеною проникністю (6—10 фм²), мають видиму тріщинуватість. Ця тріщинуватість може бути утворена під час механічної обробки (буріння свердловини або виготовлення лабораторних зразків). Однак це свідчить про крихкість досліджених порід та сприятливі умови для їх гідророзриву.

Питомий електричний опір, визначений на сухих екстрагованих зразках (питомий електричний опір мінерального скелета), змінюються від 98 до 1 585 600 Ом · м, середнє значення 107 640 Ом · м. Значні його варіації вказують на наявність неоднорідностей в текстурі порід (глинистих і піщанистих прошарків, їх невпорядкованість, а також вуглефікацію та піритизацію). Питомий електричний опір зразків порід, насичених моделлю пластової рідини (розчин

NaCl), змінюється від 1 до 33,2 Ом · м, середнє значення 11,6 Ом · м, відносний електричний опір — від 7 до 405 Ом · м, середнє значення 113 Ом · м.

Аналіз даних електрометричних досліджень показує, що для алевролітів, аргілітів і сланців параметр збільшення електричного опору досить стрімко зростає. Це свідчить про розриви струмових ланцюжків (представлених мінералізованою водою в мікропорах) навіть за незначної втрати води, тобто про складний характер порового простору. Для пісковиків спостерігається більш пологий характер графіка, що вказує на порівняно простішу структуру порового простору, більший ступінь водовіддачі та крупніший формат пор.

За результатами аналізу матеріалів лабораторних петроелектричних досліджень побудовано ряд кореляційних залежностей між ємнісно-фільтраційними та електричними властивостями досліджених порід.

За даними інверсії швидкості повздовжніх хвиль встановлені значні їх варіації, що викликані змінами літологічного складу зразків керну.

В результаті аналізу лабораторних петроакустичних матеріалів побудовано ряд кореляційних залежностей між ємнісно-фільтраційними та пружними властивостями досліджених порід.

Петрофізичні дослідження займають важливе місце у комплексі геологічних досліджень, їх широко застосовують під час вивчення фізичних властивостей гірських порід і руд з метою встановлення їх складу, структури і стану для вирішення різноманітних завдань у процесі пошуків і розвідки родовищ корисних копалин, особливо у нафтовій геології.

Список літератури

Вижва С.А., Рева М.В., Гожик А.П., Онищук В.І., Онищук І.І. Петроелектричні дослідження керну свердловини Чорноморського шельфу. *Вісник Київ. ун-ту. Геологія*, 2008. № 44. С. 4—8. [Vyzhva S. A., Reva N. V., Gozhyk A. P., Onyshchuk V. I., Onyshchuk I. I., 2008. Petroelectrical investigations of borehole core of Black Sea shelf. *Visnyk Kyivskogo universytetu. Geologiya* (44), 4—8 (in Ukrainian)].

Вижва С.А., Рева М.В., Гожик А.П., Онищук В.І., Онищук І.І. Петроелектричні дослідження керну складнопобудованих порід-колекторів. *Вісник Київ. ун-ту. Геологія*. 2010. № 50. С. 4—7. [Vyzhva S. A., Reva N. V., Gozhyk A. P., Onyshchuk V. I., Onyshchuk I. I., 2010. Petroelectrical investigations of borehole core of complexly-build reservoir rocks. *Visnyk Kyivskogo universytetu. Geologiya* (50), 4—7 (in Ukrainian)].

Вижва С.А., Онищук Д.І., Онищук В.І. Петроелектрична модель порід-колекторів Західно-Шебелинського газоконденсатного родовища. *Вісник Київ. ун-ту. Геологія*. 2012. № 57. С. 13—16. [Vyzhva S. A., Onyshchuk D. I., Onyshchuk V. I., 2012. Petroelectrical investigations of reservoir rocks of Western-Shebelynske gas condensate field. *Visnyk Kyivskogo universytetu. Geologiya* (57), 13—16 (in Ukrainian)].

Вижва С.А., Онищук Д.І., Онищук В.І. Петроелектрична модель порід-колекторів Західно-Шебелинського газоконденсатного родовища. *Вісник Київ. ун-ту. Геологія*. 2012. № 57. С. 13—16. [Vyzhva S. A., Onyshchuk D. I., Onyshchuk V. I., 2012. Petroelectrical investigations of reservoir rocks of Western-Shebelynske gas condensate field. *Visnyk Kyivskogo universytetu. Geologiya* (57), 13—16 (in Ukrainian)].

- ГОСТ 26450.2-85.* Породы горные. Методы определения коллекторских свойств. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации. Москва: Мингео СССР, 1985. 18 с. [State Standard 26450.2-85, 1985. Subsurface rocks. Techniques for determining reservoir characteristics. Technique for determining absolute gas permeability factor by stationary and non-stationary filtration. Moscow: Mingeo USSR Publ., 18 p. (in Russian)].
- ДСТУ 41-00032626-00-025-2000.* Коефіцієнт залишкового водонасичення гірських порід. Київ: Міністерства України, 2001. 17 с. [State Standard 41-00032626-00-025-2000, 2001. Residual water saturation factor of rocks. Kiev: Ministry of environment & mineral resources of Ukraine Publ., 17 p. (in Ukrainian)].
- Дахнов В.Н.* Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения пород. Москва: Недра, 1975. 343 с. [Dahnov V.N., 1975. Geophysical methods of assesment of reservoir characteristics and hydrocarbon saturation of rocks. Moscow: Nedra, 343 p. (in Russian)].
- Дортман Н. Б.* Петрофизика. Справочник. Ч. 1. Москва: Недра, 1992 а. 391 с. [Dortman N. B., 1992 а. Petrophysics. Handbook. Part 1. Moscow: Nedra, 391 p. (in Russian)].
- Дортман Н. Б.* Петрофизика. Справочник. Ч. 2. Москва: Недра, 1992 б. 304 с. [Dortman N. B., 1992 б. Petrophysics. Handbook. Part 2. Moscow: Nedra. 304 p. (in Russian)].
- Дортман Н. Б.* (ред.) Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. Справочник геофизика. Москва: Недра, 1984. 455 с. [Dortman N. B. (ed.), 1984. Physical properties of rocks and minerals Handbook of Geophysist. Moscow: Nedra, 455 p. (in Russian)].
- Пархоменко Э. И.* Электрические свойства горных пород. Москва: Наука, 1965. 164 с. [Parkhomenko E. I., 1965. Electrical properties of rocks. Moscow: Nauka, 164 p. (in Russian)].
- Продайвога Г. Т.* Акустика текстур гірських порід. Київ: ВГЛ "Обрії", 2004. 144 с. [Prodayvoda G. T., 2004. Acoustics of rocks texture. Kiev: Obriy, 144 p. (in Ukrainian)].