

УДК 550.83:552.1:537

С. Вижва, д-р геол. наук, М. Рева, канд. фіз.-мат. наук, А. Гожик, канд. геол.-мін. наук, В. Онищук, асп., І. Онищук, канд. геол. наук

ПЕТРОЕЛЕКТРИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КЕРНУ СВЕРДЛОВИНИ ЧОРНОМОРСЬКОГО ШЕЛЬФУ

Розглядаються особливості методики та результати петроелектричних досліджень при вивченні складнопобудованих теригенних колекторів. Наведені результати визначення питомого електричного опору та його зв'язок з емпіричними властивостями пісковиків одного із інтервалів свердловини, пробуреної на чорноморському шельфі.

The features of method and results of petroelectrical investigation of complex-structured terrigenous reservoir are considered. The results of determination of specific electric resistance and its connection with capacity properties of sandstones of one of Black Sea shelf drilling interval are discussed in this article.

Вступ. Визначення геоелектричних властивостей гірських порід є важливим елементом комплексних досліджень розрізів нафтогазових свердловин. При цьому одним із найбільш інформативних параметрів є питомий електричний опір проських порід (ρ). Він визначається речовинним складом та текстурою породи, її нафто-, газо-, водонасиченістю; коефіцієнтом пористості; структурою емісійного простору; мінералізацією пластових вод; температурою і тиском [1-5].

Визначення питомого електричного опору породи виконуються з метою уточнення меж зміни цього параметру для окремих типів і груп порід; виділення окремих стратиграфічних підрозділів, розрізів, фаций і геологічних регіонів; встановлення характеру залежності питомого опору порід від мінерального складу, структури, співвідношення фаз речовини, частоти і напруженості електричного поля; виявлення характеру зміни питомого електричного опору при епігенетичному перетворенні та метаморфізмі гірських порід.

Відомості, одержані в результаті лабораторних визначень питомого електричного опору порід, використовуються при виборі методів електрометрії свердловин та електророзвідки, при інтерпретації результатів цих досліджень а також для вирішення багатьох інших прикладно-геологічних задач.

Методика лабораторних петроелектричних досліджень. В лабораторних умовах питомий електричний опір гірських порід визначається шляхом вимірювання електричного опору зразка спеціальної форми, виготовленого з керну свердловини. При наших дослідженнях зразки мали форму циліндра діаметром 30 мм і довжиною 30 мм. Електричний опір (Ω) зразка породи може бути виміряний багатьма способами, які розділяються на дві основні групи: безпосередньої оцінки (по приладах) і порівняння у рівноважному режимі. У кожній з названих груп існують модифікації прямих (приладом вимірюється електричний опір) і непрямих способів (приладом вимірюється різниця потенціалів на зразку (ΔU) та на еталонному опорі R_{et} (ΔU_{et}) у вимірювальному електричному ланцюзі, або різниця потенціалів на зразку (ΔU) та сили струму (I) з подальшим розрахунком опору зразка за формулами $R_{\Delta U} = (\Delta U / \Delta U_{et}) \cdot R_{et}$ або $R_{\Delta U} = \Delta U / I$. Вимірювання можуть бути виконані як на постійному, так і на змінному струмах. При використанні прямих способів безпосередньої оцінки опору на постійному струмі вимірювання проводяться омметром (мегаомметром, тераомметром); при застосуванні непрямих способів на постійному струмі, вимірювання здійснюються вольтметром, вольтметром-амперметром, вольтметром-амперметром з охоронним кільцем, вольтметром – електрометром. При непрямих способах вимірювань на змінному струмі використовують вольтметр і вольтметр-амперметр.

Лабораторні електрометричні вимірювання зразків пісковиків однієї із продуктивних свердловин чорноморського шельфу виконані при температурі 20° С за допомогою цифрового тераомметра С.А.6547, який дозволяє виконувати високоточні вимірювання електричного опору в діапазоні від 10 кОм до 10 ТОм з цифровим записом на ЕОМ за спеціальною програмою та комплексу апаратури "ЗРА" на постійному та змінному струмі по двоелектродній схемі. Циліндричні зразки при вимірюванні вставлялися в спеціальні кернотримачі з електродами, що не поляризуються (виготовлені із спеціальної графітшованої гуми). Середня відносна похибка визначення електричного опору складала 3,2 %.

В процесі електрометричних досліджень в даній роботі питомий електричний опір зразка визначався за формулою

$$\rho = \frac{R}{\frac{l}{d} + \frac{4l}{\pi d^2}}, \quad (1)$$

де l – довжина циліндричного зразка, d – діаметр циліндричного зразка, R – електричний опір системи "опір зразка + перехідний опір електродів".

Параметр пористості P визначався за формулою

$$P = \rho_{\text{пл}} / \rho_{\text{п}}, \quad (2)$$

де $\rho_{\text{пл}}$ – питомий опір на 100 % водонасиченої породи, $\rho_{\text{п}}$ – питомий опір води.

Результати електрометричних досліджень. Виконані дослідження питомого електричного опору 12 зразків (пісковик аркозовий із глукантом – зразки 2а, 2б, 2в, 4а, 4б, пісковик кварцовий із глукантом – зразки 6а, 6б; пісковик із глукантом – зразки 8а, 8б, 8в, 10а, 10б), що відібрані в інтервалі 2439 – 2672 м однієї із свердловин Чорноморського шельфу.

За результатами лабораторних вимірювань встановлено, що значення питомого електричного опору, виміряні на зразках до їх екстрагування, складають від 44 до 387 Ом*м при середньому значенні 122 Ом*м. При цьому найнижчі опори мають зразки 4, 6, 8, найбільші – зразки 2, 10, а зразок 2 характеризується значною неоднорідністю за питомим електричним опором (інтервали опробування приведені в таб. 1).

© С. Вижва, М. Рева, А. Гожик, В. Онищук, І. Онищук, 2008

Таблиця 1. Електричні та смісні параметри досліджених пісковиків

№ п/п	№ зразка	Лабораторний № зразка	Інтервал відбору керн, м	Відкрита пористість, %	Проникність, фм ²	Питомий електричний опір, Ом*м			
						до екстрагування	після екстрагування	насичені р-ном NaCl M=38,15 г/л	параметр пористості, Р
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	2а	2439-2444	12,54	6,07	231,7	87879	3,73	17,9
2	2	2б	2439-2444	12,66	4,65	47,0	6592	3,34	16,0
3	2	2в	2439-2444	12,38	4,66	386,6	13166	3,81	18,2
4	2	середнє	2439-2444	12,53	5,13	221,8	35879	3,63	17,4
4	4	4а	2591-2596	12,89	6,39	44,0	5788	3,32	15,9
5	4	4б	2591-2596	12,80	6,75	46,6	22366	3,36	16,1
6	4	середнє	2591-2596	12,84	6,57	45,3	14077	3,34	16,0
6	6	6а	2596-2605	11,52	3,10	55,8	49662	3,57	17,1
7	6	6б	2596-2605	11,79	3,22	48,4	10653	3,44	16,5
8	6	середнє	2596-2605	11,66	3,16	52,1	30158	3,51	16,8
8	8	8а	2658-2665	16,54	8,94	80,4	13222	2,28	10,9
9	8	8б	2658-2665	16,02	5,29	57,6	16814	2,29	11,0
10	8	8в	2658-2665	16,11	5,17	57,1	12035	2,22	10,6
11	8	середнє	2658-2665	16,23	6,46	65,0	14024	2,26	10,8
11	10	10а	2665-2672	18,36	5,82	229,7	20312	2,15	10,3
12	10	10б	2665-2672	17,46	5,35	173,3	21317	2,10	10,1
13	10	середнє	2665-2672	17,91	5,59	201,5	20815	2,12	10,2

Питомий електричний опір мінерального скелета досліджених пісковиків змінюється від $5,8 \cdot 10^3$ до $88 \cdot 10^3$ Ом*м при середньому значенні $23,388 \cdot 10^3$ Ом*м. При цьому спостерігаються варіації значень питомого опору зразків 2, 4, 6, що пояснюється неоднорідностями в текстурі пісковиків (наявність глинистих і піщаних прошарків та їх невпорядкованість). Пісковики представлені зразками 8, 10 відмічаються відносно однорідними значеннями питомого опору (див. таб. 1).

При насиченні пісковиків розчином NaCl з мінералізацією 38,15 г/л (модель пластового флюїду) за електрометричними даними досить чітко виділяються дві їх групи: перша в інтервалі 2658 – 2672 м (зразки 8, 10), що характеризується значеннями питомого електричного опору 2,10 – 2,28 Ом м та параметра пористості 10,1 – 10,9, і друга група в інтервалі 2439 – 2605 м (зразки 2, 4, 6) з питомим опором 3,32 – 3,81 Ом*м та значеннями параметра пористості 15,9 – 18,2. До речі ці групи виділяються і за значеннями відкритої пористості (див. таб. 1).

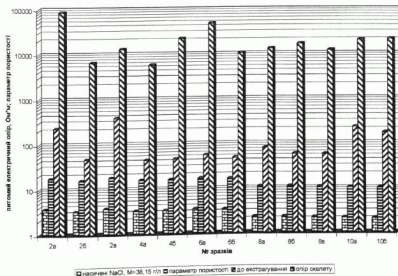


Рис. 1. Гістограма розподілу питомих електричних опорів та параметра пористості (при температурі 20°С) в залежності від умов вимірювання (стану зразків)

Визначення питомого електричного опору при відгонці залишкової води на центрифугі ОС-6М (від 1000 до 6000 об/хв. з кроком 1000 об/хв., прискорення від 1,5 г до 50 г) дало змогу встановити кореляційні залежності питомого опору пісковиків від їх водонасичення:

група 1 $\rho = 16,2277 \cdot \exp(-0,0196^x)$; $r = -0,9576$; група 2 $\rho = 36,8159 \cdot \exp(-0,0236^x)$; $r = -0,9359$ (рис. 2).

Ця залежність має експоненціальний характер та високий коефіцієнт кореляції. При цьому чітко виділяються вищезазначені дві групи пісковиків.

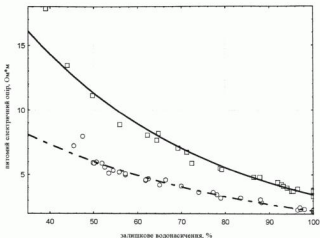


Рис. 2. Кореляційна залежність питомого електричного опору пісковиків від їх водонасичення (група 1 (пунктирна лінія); інтервал 2658 – 2672 м; середня пористість 17 %; середня проникність 6,2 фм²; група 2 (суцільна лінія) інтервал 2439 – 2605 м; середня пористість 12 %; середня проникність 5,2 фм²)

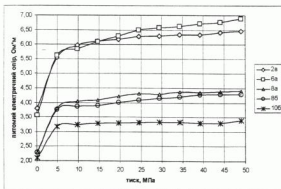


Рис. 3. Графік залежності зміни питомого електричного опору пісковиків з інтервалів 2439 – 2444 м (зразок 2а), 2596 – 2605 м (зразок 6а), 2658 – 2665 м (зразок 8а, 8б) та 2665 – 2672 м (зразок 10б) від тиску (лабораторні умови, $t=20^{\circ}\text{C}$)

Характер зміни питомого електричного опору пісковиків ($\rho_{\text{пл}}$) при зміні тиску від атмосферного до 49 МПа в лабораторних умовах представлено на рис. 3. Аналіз графіків залежності питомого електричного опору від тиску показує, що відбувається досить значне зростання $\rho_{\text{пл}}$ при зміні тиску від атмосферного до 4,9 МПа, яке складає для пісковиків 1 групи (зразки 8, 10) від 57 % до 67 %, а для другої групи (зразки 2, 4, 6) – від 46 % до 51 %. При подальшому підвищенню тиску, ріст питомого електричного опору сповільнюється при цьому градієнт його росту на 4,9 МПа складає, в середньому, для пісковиків 1 групи від 10 % до 13 %, а для другої групи – 13 % – 14 %. На думку авторів це викликано закриттям деяких пор (в основному тріщин) внаслідок дії зовнішнього тиску. Відкрита пористість під дією зовнішнього тиску зменшується на 0,8 – 0,9 % (для 1 групи) та на 0,5 – 0,8 % (для 2 групи) для пластових умов ($P=33,5 - 36,3$ МПа).

Вимірювання питомого електричного опору під тиском дало можливість оцінити питомий електричний опір досліджених пісковиків в пластових умовах:

для аркозового пісковика тонкозернистого з інтервалу 2439 – 2444 м (зразок 2) питомий опір складає 2,6 Ом·м (пластовий тиск 33,5 МПа при температурі 85° С);

для пісковика кварцового, з глауконітом, дрібнозернистого з інтервалу 2596 – 2605 м (зразок 6) питомий опір

складає 1,5 – 1,55 Ом*м (пластовий тиск 36,3 МПа при температурі 100°С)

для дрібнозернистого пісковику з інтервалу 2658 – 2665 м (зразок 8) питомий опір складає 1,5 – 1,55 Ом*м (пластовий тиск 36,3 МПа та температура 102°С);

для тонкозернистого пісковику з інтервалу 2665 – 2672 м (зразок 10) питомий опір складає 1,2 Ом*м (пластовий тиск 36,3 МПа при температурі 102°С).

Висновки. За електрометричними даними досить чітко виділяються 2 групи пісковиків: перша в інтервалі 2658 – 2672 м (зразки 8, 10), що характеризується значеннями питомого електричного опору 2,10 – 2,28 Ом*м та значеннями параметра пористості 10,1 – 10,9, і друга група в інтервалі 2439 – 2605 м (зразки 2, 4, 6) з питомим опором 3,32 – 3,81 Ом*м та значеннями параметра пористості 15,9 – 18,2.

Залежність питомого опору пісковиків від їх водонасичення має експоненціальний характер та високий коефіцієнт кореляції. При цьому також чітко виділяються вищезазначені дві групи пісковиків.

Вимірювання питомого електричного опору під тиском дало можливість оцінити питомий електричний опір досліджених пісковиків в пластових умовах, який складає від 2,6 Ом*м для аркозового пісковику тонкозернистого з інтервалу 2439 – 2444 м (зразок 2) до 1,2 Ом*м для тонкозернистого пісковику з інтервалу 2665 – 2672 м (зразок 10). Пісковики з інтервалу 2596 – 2665 м (зразки 6, 8) мають проміжні значення питомого електричного опору 1,5 – 1,55 Ом*м.

Питомий електричний опір порід-колекторів є важливою характеристикою стану прських порід і слугує одним із критеріїв при виділенні перспективних інтервалів.

Досліджені пісковики за величиною параметра пористості відносяться до III класу колекторів – пористість середня [1].

Дана робота розглядається авторами як методична розробка, основним завданням якої є відпрацювання методики досліджень електричних характеристик порід-колекторів Чорноморського шельфу та встановлення зв'язків між електричним опором і емісіоно-фільтраційними характеристиками з врахуванням свердловинних умов (тиску і температури). Для побудови повноцінної петроелектричної моделі порід-колекторів та встановлення залежностей "кern – геофізика" обсяг досліджень необхідно значно розширити.

1. Дажено В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения пород. – Москва: Недра, 1975. 2. Петрофизика. Справочник. /Под ред. Н.Б. Дортман / ч.1. – Москва: Недра, 1992. 3. Петрофизика. Справочник. /Под ред. Н.Б. Дортман / ч.2. – Москва: Недра, 1992. 4. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. Справочник геофизика. – Москва: Недра, 1984. 5. Ладомонько Э.И. Электрические свойства горных пород. – Москва: Наука, 1985.

Надійшло до редакції 22.02.08.

УДК 550.830

Г. Продайвода, д-р фіз.-мат. наук, Т. Продайвода, асп.

ВИЗНАЧЕННЯ АНОМАЛЬНО ВИСОКИХ ПЛАСТОВИХ ТИСКІВ ЗА ДАНИМИ ВСП

Розглядається метод, який дозволяє визначити зону аномально високих пластових тисків і отримати кількісну оцінку пористості та порового тиску. Визначені термопружні властивості та їх похідні по тиску і температурі глинистих мінералів каолініту, гідролуду і монтморилоніту на штучних зразках глин мономінерального складу.

The method for determination of extra pressure zone, which provides quantitative estimation of porosity and pore pressure. Thermoelastic properties and their derivatives by pressure and temperature of kaolinite, hydromica, montmorillonite minerals are defined on artificial samples of monomineralic clays.

Проблема видобутку нафти та газу із глибокозалегаючих горизонтів з кожним роком стає все більш актуальною. Буріння свердловин на великі глибини, як правило, пов'язане із значними труднощами, які обумовлені наявністю на цих глибинах товщ із аномально високими тисками флюїдів. Для визначення порового тиску використовують дані польових сейсмічних і промислово-геофізичних досліджень. Для оцінки пластових і порових тисків необхідні надійні дані про термопружні властивості основних глинистих мінералів. Таких даних в літературних джерелах дуже мало. В зв'язку з цим нами були визначені термопружні властивості глинистих мінералів каолініту, гідролуду і монтморилоніту шляхом інверсії експериментальної залежності швидкості позовдовжніх хвиль від тиску і температури на штучних зразках чистих глин мономінерального складу за даними роботи [1].

Для цього використовувався новий метод визначення термопружних і пружних модулів мінералів та їх похідних по тиску і температурі, який детально описаний в роботі [2].

При чисельних розрахунках враховувалась мінералізація води, яка суттєво впливає на характер зміни швидкості позовдовжньої хвилі. Швидкість пружних хвиль у мінералізованій воді з ростом температури до 75 °С спочатку збільшується, а при її подальшому зростанні монотонно зменшується. Для оцінки швидкості розповсюдження позовдовжньої хвилі V_p у мінералізованій воді при зміні концентрації, тиску і температури використовувалась регресійне рівняння:

$$V_p = 14,10 + 4,21T - 0,037T^2 + 1,14C + 0,18P, \quad (1)$$

де T – температура води, °С; C – мінералізація води, %; P – гідростатичний тиск, кг/см².

При тисканні ефективні швидкості позовдовжніх і поперечних хвиль зростають, але відношення V_p/V_s у гідролуду і каолініту зменшується із ростом тиску. Ефективні модулі пружності K^* і G^* монотонно зростають при збільшенні тиску.

Ефективні швидкості позовдовжніх і поперечних хвиль штучних зразків глинистих мінералів при нагріванні зменшуються, але відношення V_p/V_s спочатку зростає, а потім монотонно зменшується. Аналогічний характер залежності