

УДК 550.83:552.1:537

С. Вижва, д-р геол. наук, проф.,  
Д. Онищук, асп., В. Онищук, канд. геол. наук

## ПЕТРОЕЛЕКТРИЧНА МОДЕЛЬ ПОРІД-КОЛЕКТОРІВ ЗАХІДНО-ШЕБЕЛИНСЬКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО РОДОВИЩА

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.М. Карпенком)

*Розглядаються особливості методики та результати петроелектричних досліджень при вивченні складнопобудованих теригених колекторів. Наведені результати визначення електричних параметрів та їх зв'язок з ємнісними властивостями пісковиків, алевролітів та аргілітів одного із інтервалів свердловини, пробуреної в центральній частині ДДЗ. Побудовані їх петроелектричні моделі.*

*The features of technique and results of petroelectrical investigation of complex-structured terrigenous reservoir are considered. As well results of determination of electric data and their connection with capacity properties of sandstones and siltstones (mudstones) of one drilling interval of the Dniepr-Donetsk Basin are cited in this article. Their petroelectrical models are created.*

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

Одним із найбільш інформативних параметрів при визначенні геоелектричних властивостей гірських порід є питомий електричний опір ( $\rho$ ). Цей параметр визначається: речовинним складом та текстурою породи; структурою ємнісного простору; її нафто-, газо- та водонасиченістю; коефіцієнтом пористості; мінералізацією пластових вод; температурою та тиском [1-7].

Метою даних досліджень було розробка та створення петроелектричних моделей порід-колекторів, як основи комплексного аналізу їх електричних параметрів та зв'язків з ємнісно-фільтраційними властивостями. Визначення питомого електричного опору порід-колекторів виконується для уточнення меж його зміни для окремих типів і груп порід; виділення окремих стратиграфічних горизонтів, розрізів та фазій; встановлення характеру залежності його від мінерального складу, структури порового простору, співвідношення фаз речовини, частоти і напруженості електричного поля; виявлення характеру зміни електричного опору при епігенетичному перетворенні та метаморфічних змінах гірських порід.

Особливий інтерес представляє встановлення основних факторів, що впливають на зміну питомого електричного опору. Зокрема, комплексні петрографічні, геохімічні та петроелектричні дослідження дозволяють встановити зв'язки між електричним опором та мінеральним складом зразків керну. Петроелектричні дослідження до і після екстрагування зразків та після їх насичення моделлю пластової рідини дозволяють оцінити вплив солей і пустот на цей параметр. Відомості, одержані в результаті лабораторних досліджень про зміни питомого електричного опору порід, використовуються при інтерпретації результатів електрометричних методів досліджень свердловин та польової електророзвідки.

В статті наведені особливості та результати лабораторних петроелектричних досліджень керну з інтервалу 4929–5491 м пошукової свердловини Західно-Шебелинської площі, що розташована в центральній частині Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ). Породи з дослідженого інтервалу представлені переважно різнозернистими пісковиками, алевролітами та аргілітами московського ярусу середнього карбону.

**Експериментальні дослідження.** В процесі лабораторних досліджень визначався питомий електричний опір зразків порід при різних станах (сухі, неповністю та повністю насичені розчином-імітатором пластового флюїда) в атмосферних умовах, а також в умовах на-

ближених до пластових. За допомогою сучасного RCL-метра МНС-1100 визначена також діелектрична проникність досліджених порід та зроблена спроба аналізу цих матеріалів.

Лабораторні електрометричні вимірювання сухих зразків керну 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 на постійному струмі по двохелектродній схемі [5-6]. Для вимірювання зразків, насичених розчином NaCl ( $M=196$  г/л) застосовувався, RCL-метр МНС-1100 та вимірювач опору Ф-4103-М1. Циліндричні зразки при вимірюванні вставлялися в спеціальний кернотримач з електродами, що не поляризуються, які виготовлені із спеціальної графітیزованої гуми. Середня відносна похибка визначення електричного опору склала 2,6 %.

**Аналіз даних.** За результатами лабораторних вимірювань встановлено, що значення питомого електричного опору виміряні на сухих екстрагованих зразках (питомий електричний опір мінерального скелету) змінюється від 44930 до майже 71974100 Ом·м при середньому значенні 8101680 Ом·м. При цьому спостерігаються значні варіації значень питомого опору зразків, що пояснюється неоднорідностями в текстурі порід (наявність глинистих і піщанистих прошарків та їх неупорядкованість, а також піритизація). Питомий електричний опір зразків порід насичених моделлю пластової рідини (розчин NaCl) змінюється від 2,7 до 33,3 Ом·м при середньому значенні 8 Ом·м.

За матеріалами лабораторних досліджень побудовані кореляційні залежності (рис. 1а та 1б, для пісковиків, алевролітів та аргілітів, відповідно) між коефіцієнтом пористості ( $k_n$ ) і відносним електричним опором ( $P$ ) дослідженої колекції.

Визначені рівняння Арчі-Дахнова мають вигляд:  

$$P = 5,936 \cdot k_n^{-0,858}, \quad \text{при} \quad R^2 = 0,905 \quad (\text{пісковики}),$$

$$P = 0,243 \cdot k_n^{-1,62}, \quad \text{при} \quad R^2 = 0,959 \quad (\text{алевроліти та аргіліти}),$$

де  $P = \rho_{\text{пв}} / \rho_{\text{в}}$ ,  $\rho_{\text{пв}}$  – питомий електричний опір повністю водонасичених порід,  $\rho_{\text{в}}$  – питомий електричний опір пластової води.

Аналіз отриманих даних показує, що пісковики мають діапазон зміни відносного електричного опору від 38 до 231 при середньому значенні 89. Відповідний цьому діапазон зміни коефіцієнта пористості складає від 0,014 до 0,095 при середньому значенні 0,054. Для алевролітів та аргілітів діапазон зміни відносного електричного опору складає від 108 до 405 при середньому значенні 180, а коефіцієнта пористості – від 0,011 до 0,024 при середньому значенні 0,019.

З метою дослідження залежності петрофізичних параметрів від ступеню водонасиченості (а отже газонасиченості) порід виконані дослідження зміни питомого електричного опору при відгонці води на центрифугі ОС-6М (при режимах відгонки від 1000 до 6000

об/хв. з кроком 1000 об/хв., тиск витіснення води змінюється від 0,02 до 1,05 МПа).

Отримані типові криві капілярного тиску, що характеризують процес витіснення флюїда з пор, наведені на рис. 2а (для пісковиків) і на рис. 2б (для алевролітів та аргілітів).

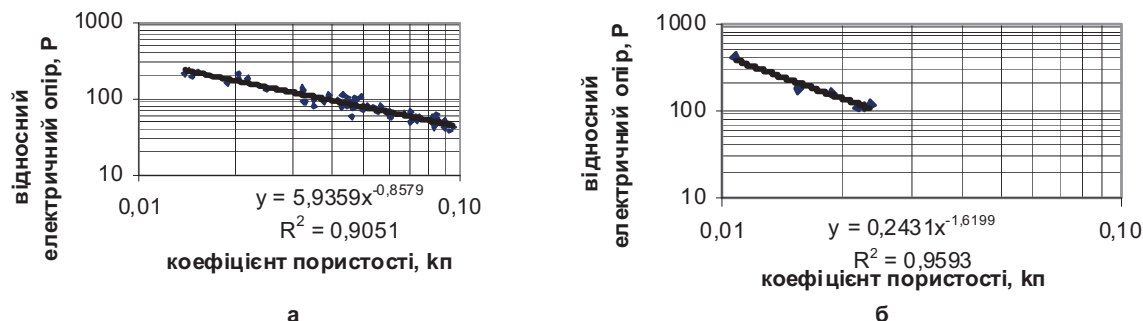


Рис. 1. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ( $k_p$ ) і відносним електричним опором ( $P$ ) – рівняння Арчі-Дахнова (лабораторні умови): а – пісковики, б – алевроліти та аргіліти

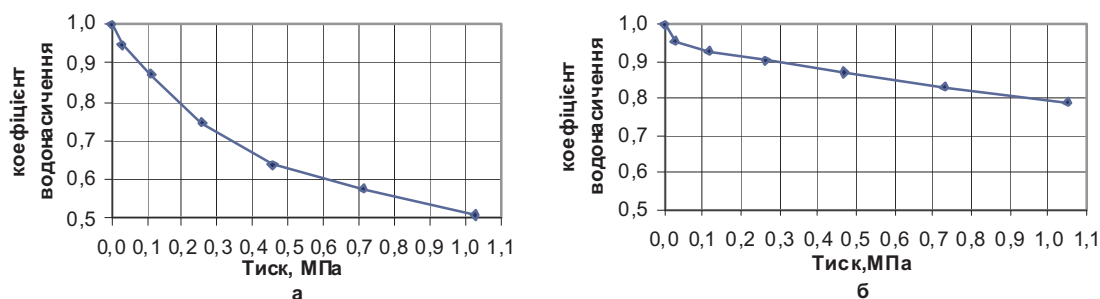


Рис. 2. Типова крива капілярного тиску: а – для пісковиків, б – для алевролітів та аргілітів

Із розгляду цих графіків можна зробити висновок, що алевроліти та аргіліти характеризуються слабкими фільтраційними властивостями, мають коефіцієнт залишкового водонасичення більший за 0,78, а їх пустотний простір представлений мікропорами. Пісковики мають коефіцієнт залишкового водонасичення 0,45-0,55, що також вказує на їх невисокі фільтраційні властивості.

Петроелектричні дослідження при центрифугуванні виконувались шляхом серії вимірювань електричного опору насичених зразків моделлю пластової води: до центрифугування та після центрифугування при режимах відгонки від 1000 до 6000 об/хв. з кроком 1000

об/хв. (7 циклів вимірювань). Паралельно визначались коефіцієнт водонасичення та швидкість пружних хвиль.

В результаті статистичного аналізу отриманих даних встановлені кореляційні залежності параметра збільшення електричного опору ( $P_H$ ) від коефіцієнта водонасичення ( $k_b$ ) для пісковиків, алевролітів та аргілітів:  $P_H = 1,081 \cdot k_b^{-1,775}$ , при  $R^2 = 0,844$  (пісковики),  $P_H = 0,927 \cdot k_b^{-8,255}$ , при  $R^2 = 0,79$  (алевроліти та аргіліти), де  $P_H = \rho_{нв} / \rho_{пв}$ ,  $\rho_{нв}$  – питомий електричний опір неповністю водонасичених порід,  $\rho_{пв}$  – питомий електричний опір повністю водонасичених порід. Ці кореляційні залежності представлені на рис. 3а та 3б.

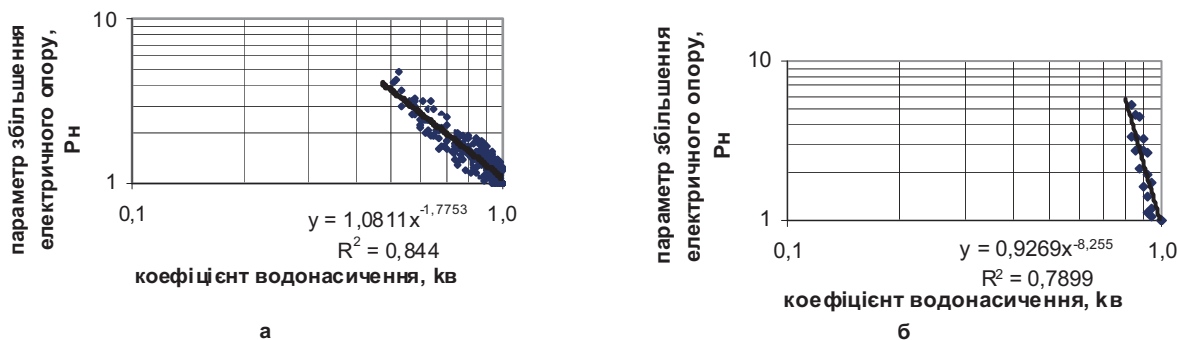


Рис. 3. Кореляційна залежність між коефіцієнтом водонасичення ( $k_b$ ) та параметром збільшення електричного опору ( $P_H$ ): а – пісковики, б – алевроліти та аргіліти

Аналіз отриманих даних показує, що пісковики мають діапазон зміни параметра збільшення електричного опору від 1 до 4 при середньому значенні 1,5. Відповідний цьому

діапазон зміни коефіцієнта водонасичення складає від 0,52 до 1 при середньому значенні 0,8. Для алевролітів та аргілітів діапазон зміни  $P_H$  складає від 1 до 5,3 при серед-

ньому значенні 2,4, а коефіцієнта водонасичення – від 0,82 до 1 при середньому значенні 0,91.

Розгляд графіків цих залежностей показує, для алевролітів та аргілітів параметр збільшення електричного опору досить стрімко зростає, що свідчить про розриви струмових ланцюжків (представлених мінералізованою водою в мікропорах) навіть при незначній втраті води, тобто про складний характер порового простору. Для пісковиків спостерігається більш пологий характер графіка, що свідчить про порівняно простішу структуру порового простору, більшу ступінь водовіддачі та крупніший формат пор.

Для оцінки питомого електричного опору порід в пластових умовах виконані його вимірювання на спеціальній установці високого тиску ВСЦ-1000 при зміні тиску від атмосферного до 59 МПа.

Отримані дані показують що електричний опір порід зростає із збільшенням тиску, що зумовлено закриттям мікротріщин та деформаціями порового простору. Аналіз отриманих даних дозволив визначити залежність середнього значення коефіцієнта збільшення питомого електричного опору ( $Q$ ) від тиску ( $p$ ) для пісковиків, алевролітів та аргілітів, що виражається поліномом 3 порядку:

$$Q = 3 \cdot 10^{-5} p^3 - 32 \cdot 10^{-4} \cdot p^2 + 14,67 \cdot p + 1,017, \quad \text{при } R^2=0,99 \text{ (пісковики)},$$

$$Q = 5 \cdot 10^{-5} p^3 - 58 \cdot 10^{-4} \cdot p^2 + 21,85 \cdot p + 1,218, \quad \text{при } R^2=0,942 \text{ (алевроліти)}$$

Графіки цих залежностей представлені на рис. 4а та рис. 4б.

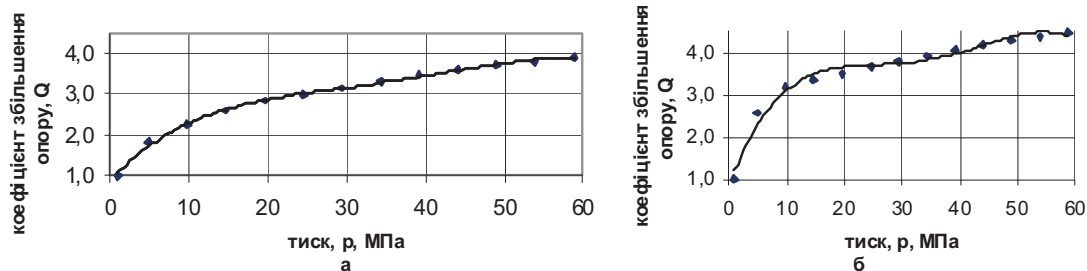


Рис. 4. Кореляційна залежність коефіцієнта збільшення питомого електричного опору ( $Q$ ) від тиску ( $p$ ): а – для пісковиків, б – для алевролітів та аргілітів

Аналіз отриманих даних показує, що пісковики мають діапазон зміни коефіцієнта збільшення опору від 1 до 3,9 при збільшенні всесічного тиску від атмосферного до 59 МПа. Для алевролітів та аргілітів діапазон зміни коефіцієнта збільшення опору складає від 1 до 4,5 при вищевказаних межах зміни тиску.

Розгляд графіків цих залежностей дозволяє виділити три ділянки з різним характером зміни питомого електричного опору. На 1 ділянці в діапазоні зміни тиску від атмосферного до 14,7-17,7 МПа спостерігається досить значний ріст коефіцієнта збільшення опору, для пісковиків – до 2,7, а для алевролітів та аргілітів – до 3,5, причому для останніх він інтенсивніший ніж для пісковиків. Цей процес може бути викликаний інтенсивним закриттям мікротріщин, що зменшує канали провідності. Наступний діапазон зміни тиску від 14,7-17,7 до 39 МПа характеризується деякою стабілізацією зміни електричного опору. При цьому коефіцієнт збільшення опору змінюється від 2,7 до 3,5 для пісковиків та від 3,5 до 4 для алевролітів та аргілітів. Для останніх спостерігається більш виражена "полічка" ніж для пісковиків. В діапазоні зміни тиску від 39 до 59 МПа спостерігається ріст

коефіцієнта збільшення опору з меншою інтенсивністю ніж у першому діапазоні, але з більшою ніж у другому, для пісковиків – до 3,9, а для алевролітів та аргілітів – до 4,5. Процес повільного росту коефіцієнта збільшення опору в 2 та 3 діапазонах (ділянках) може бути викликаний порівняно меншими (ніж у першому діапазоні) деформаціями порового простору, що ускладнює та перериває канали провідності.

Отримані дані при вимірюваннях питомого електричного опору під тиском дали можливість оцінити його значення для досліджених порід в пластових умовах. За матеріалами петроелектричних досліджень при високих тисках встановлена залежність між коефіцієнтом пористості ( $k_{п,пл}$ ) та параметром пористості ( $P_{пл}$ ) в пластових умовах. Визначене рівняння Арчі-Дахнова для пісковиків має вигляд (рис. 5а):  $P_{пл} = 23,68 \cdot k_{п,пл}^{-0,818}$ , при  $R^2=0,879$ .

Для алевролітів та аргілітів рівняння Арчі-Дахнова в пластових умовах має наступний вигляд (рис. 5б):  $P_{пл} = 1,836 \cdot k_{п,пл}^{-1,42}$ , при  $R^2=0,963$ .

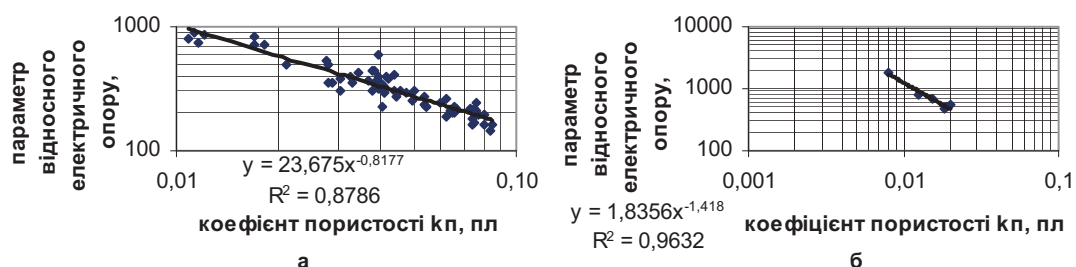


Рис. 5. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ( $k_{п,пл}$ ) та параметром пористості ( $P_{пл}$ ) в пластових умовах: а – пісковики, б – алевроліти та аргіліти

З метою оцінки електричної анізотропії виконані вимірювання електричного опору за "напластуванням" і вхрест "напластування". Коефіцієнт електричної анізотропії  $\lambda$  визначався за допомогою формули:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_l}},$$

де  $\rho_n$ ,  $\rho_l$  – питомий електричний опір вхрест і за "напластуванням", відповідно.

В результаті аналізу отриманих даних визначено, що коефіцієнт анізотропії сухих екстрагованих пісковиків змінюється від 1,03 до 1,78 при середньому значенні 1,23. Коефіцієнт анізотропії пісковиків, насичених розчином NaCl, змінюється від 1,01 до 1,33 при середньому значенні 1,12.

Комплексний аналіз сукупності петрофізичних даних був основою при визначенні петроелектричної моделі різнозернистих пісковиків, алевролітів та аргілітів. Петроелектрична модель в даній роботі представлена у вигляді геоелектричної інформації та кореляційних залежностей між петроелектричними параметрами та фізичними властивостями порід-колекторів, що зведені в таблицю.

Петроелектричні моделі пісковиків, алевролітів та аргілітів з інтервалу 4929–5491 м пошукової свердловини Західно-Шебелинської площі характеризується наступними електричними параметрами та кореляційними зв'язками, що зведені в таблицю 1.

Аналіз наведених даних свідчить про те, що електрометричні методи є потужним засобом як лабораторних так і польових досліджень, досить ефективні і надають широку та цінну інформацію про властивості порід.

**Висновки.** Петроелектричні дослідження займають важливе місце у петрофізичному комплексі і широко застосовуються при вивченні фізичних властивостей гірських порід і руд з метою встановлення їх складу, структури і стану при вирішенні різноманітних завдань при пошуках і розвідці родовищ корисних копалин, особливо у нафтовій геології.

В процесі експериментальних лабораторних досліджень вивчені петроелектричні параметри порід-колекторів, встановлені емпіричні кореляційні залежності між петроелектричними параметрами та ємкісно-фільтраційними властивостями пісковиків, алевролітів та аргілітів, що слугують основою геологічної інтерпретації геофізичних даних. Ці залежності апроксимуються степеневою функцією.

На базі комплексного аналізу всієї наявної інформації та виконаних петроелектричних досліджень визначено петроелектричні моделі пісковиків, алевролітів та аргілітів. Аналіз розроблених петроелектричних моделей пісковиків, алевролітів та аргілітів показує, що вони суттєво розрізняються за електричними параметрами. Впровадження таких моделей для різних типів порід може бути цінним інструментом петрофізичних досліджень. В подальшому, комплекс петроелектричних досліджень гірських порід, раціонально було б доповнити вивченням діелектричної проникності, тангенса кута діелектричних втрат порід-колекторів, оцінити інформативність геоелектричних параметрів, що контролюють зміни електричного опору сухих екстрагованих зразків з часом при пропусканні постійного струму та встановити кореляційні залежності їх з даними геофізичних досліджень свердловин.

Результати петроелектричних досліджень наведені в цій роботі показують, що електрометричні методи є потужним засобом як лабораторних так і польових досліджень, досить ефективні і надають широку та цінну інформацію при вивченні порід-колекторів.

Таблиця 1

Петроелектричні моделі порід з інтервалу 4929–5491 м пошукової свердловини Західно-Шебелинської площі

№ з/п	Петроелектричний параметр/ Кореляційна залежність	Межі зміни параметра (середнє)/ Кореляційне рівняння (коэф. кореляції)	
		Пісковики	Алевроліти та аргіліти
1	Питомий електричний опір сухих екстрагованих порід	50250–71974100 Ом·м (8819800 Ом·м)	44930–1150800 Ом·м (321870 Ом·м)
2	Питомий електричний опір порід, насичених моделлю пластової води	2,7–19 Ом·м (7,3 Ом·м)	8,9–33,3 Ом·м (14,8 Ом·м)
3	Відносний електричний опір (P) при лабораторних умовах	33–231 (89)	108–405 (180)
4	Параметр пористості (P) при пластових умовах	147–902 (351)	488–1825 (811)
5	Відносний електричний опір (лабораторні умови)	$P = 5,9359 \cdot k_n^{-0,8579}$ ( $R^2=0,9051$ )	$P = 0,243 \cdot k_n^{-1,62}$ ( $R^2=0,959$ )
6	Залежність Арчі-Дахнова (пластові умови)	$P_{пл} = 23,68 \cdot k_{n,пл}^{-0,818}$ ( $R^2=0,879$ )	$P_{пл} = 1,836 \cdot k_{n,пл}^{-1,418}$ ( $R^2=0,963$ )
7	Коефіцієнт електричної анізотропії сухих екстрагованих порід	1,03–1,78 (1,23)	–
8	Коефіцієнт електричної анізотропії порід, насичених пластовою водою	1,01–1,33 (1,12)	–
9	Параметр збільшення електричного опору ( $P_n$ )	1–4 (1,5)	1–5,3 (2,4)
10	Кореляційна залежність між коефіцієнтом водонасиченості ( $k_s$ ) та параметром збільшення електричного опору ( $P_n$ )	$P_n = 1,081 \cdot k_s^{-1,775}$ ( $R^2=0,844$ )	$P_n = 0,927 \cdot k_s^{-8,255}$ ( $R^2=0,79$ )
11	Кореляційна залежність коефіцієнта збільшення питомого опору порід (Q) від тиску (p)	$Q = 3 \cdot 10^{-5} p^3 - 32 \cdot 10^{-4} p^2 +$ $+14,67 \cdot 10^{-2} p + 1,017$ ( $R^2=0,99$ )	$Q = 5 \cdot 10^{-5} p^3 - 58 \cdot 10^{-4} p^2 +$ $+21,85 \cdot 10^{-2} p + 1,218$ ( $R^2=0,942$ )
12	Коефіцієнт збільшення електричного опору при збільшенні всебічного тиску від атмосферного до 59 МПа	1–3,9 (3)	1–4,5 (3,6)

1. Дахнов В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения пород. – М.: Недра, 1975. – 343 с.  
2. Вижева С.А., Рева М.В., Гожик А.П., Онищук В.І., Онищук І.І. Петроелектричні дослідження керну свердловини Чорноморського шельфу //Вісник Київського університету. Геологія. – К., 2008. – № 44 – С. 4–8.  
3. Вижева С.А., Рева М.В., Гожик А.П., Онищук В.І., Онищук І.І. Петроелектричні дослідження керну складнопобудованих порід-колекторів //Вісник Київського університету "Геологія". – К., 2010. – № 50. – С. 4–7.,

4. Пархоменко Э.И. Электрические свойства горных пород. – М.: Наука, 1965. – 164 с.  
5. Петрофизика. Справочник. / Под ред. Н.Б. Дортман. – Ч.1. – М.: Недра, 1992. – 391 с.  
6. Петрофизика. Справочник. / Под ред. Н.Б. Дортман. – Ч.2. – М.: Недра, 1992. – 304 с.  
7. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. Справочник геофизика. – М.: Недра, 1984. – 455 с.