

ГЕОФІЗИКА

УДК 550.8.056

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.03>С. Вижва¹, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: s.vyzhva@knu.ua;В. Онищук¹, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: viktor.onyshchuk@knu.ua;М. Орлюк^{1,2}, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: orliuk@ukr.net;І. Онищук¹, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,
E-mail: oivan1@ukr.net;М. Рева¹, канд. фіз.-мат. наук, доц.,
E-mail: mvreva@gmail.com;О. Шабатура¹, канд. геол. наук,
E-mail: dard@ukr.net;¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;²Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України,
просп. Академіка Палладіна, 32, м. Київ, 03142, Україна**ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ПРУЖНІ ПАРАМЕТРИ УЩІЛЬНЕНИХ ТЕРИГЕННИХ ПОРІД КАРБОНУ СХІДНОЇ ЧАСТИНИ ПІВНІЧНОЇ ПРИБОРТОВОЇ ЗОНИ ДДЗ**

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

Присвячено вивченню електричних і акустичних параметрів ущільнених теригенних порід карбону східної частини північної прибортової зони Дніпровсько-Донецької западини.

Установлено, що в атмосферних умовах значення питомого електричного опору сухих екстрагованих порід (питомий електричний опір мінерального скелета) змінюється: для алевролітів – від 6,522 кОм·м до 2,782 МОм·м (середнє значення 1,033 МОм·м); для пісковиків – від 16,18 кОм·м до 206,815 МОм·м (середнє 27,973 МОм·м). Питомий електричний опір порід, насичених моделлю пластової води (мінералізація $M=180$ г/л), змінюється: для алевролітів – від 3,3 Ом·м до 26,8 Ом·м (середнє 8,5 Ом·м); для пісковиків – від 2,9 Ом·м до 20,3 Ом·м (середнє 8,2 Ом·м).

Лабораторними дослідженнями встановлено, що в атмосферних умовах варіації відносного електричного опору лежать у межах: для алевролітів – від 41,2 до 277,9 (середнє 96,2); для пісковиків – від 34,0 до 238,5 (середнє 94,5).

Електрометричні дослідження зразків порід у змодельованих пластових умовах (температура $t=94-126^{\circ}\text{C}$; ефективний тиск $p_{\text{еф}}=41-55$ МПа, мінералізація води $M=180$ г/л) показали, що питомий електричний опір порід змінюється: для алевролітів – від 0,4 Ом·м до 7,7 Ом·м (середнє 2,1 Ом·м); для пісковиків – від 0,4 Ом·м до 3,5 Ом·м (середнє 1,3 Ом·м). Внаслідок закриття мікротріщин та деформації порового простору електричний опір порід зростає із збільшенням тиску. Регресійний зв'язок коефіцієнта збільшення питомого електричного опору з тиском для досліджених порід виражається поліномом 2 порядку.

Проведеними дослідженнями встановлено, що у пластових умовах відносний електричний опір порід змінюється: для алевролітів – від 132 до 2480 (середнє 562); для пісковиків – від 81 до 953 (середнє 339).

Лабораторні акустичні дослідження швидкостей поширення поздовжніх хвиль у сухих екстрагованих породах показали, що цей параметр змінюється: в алевролітах – від 2616 м/с до 4706 м/с (середнє 3940 м/с); в пісковиках – від 3660 м/с до 4971 м/с (середнє 4245 м/с). При насиченні порід моделлю пластової води цей параметр змінюється: для алевролітів – від 3596 м/с до 5438 м/с (середнє 4681 м/с); для пісковиків – від 4302 м/с до 5463 м/с (середнє 4942 м/с).

Фізичним моделюванням пластових умов встановлено, що швидкість поздовжніх хвиль змінюється: для алевролітів – від 3763 м/с до 6223 м/с (середнє 5053 м/с); для пісковиків – від 4430 м/с до 5752 м/с (середнє 5176 м/с). Із збільшенням тиску швидкість поздовжніх хвиль зростає унаслідок закриття мікротріщин і деформації порового простору. Залежність збільшення швидкості від тиску описується поліномом 2 порядку.

Комплексний аналіз даних лабораторних електрометричних та акустичних досліджень порід дозволив установити кореляційні зв'язки між фільтраційно-ємнісними, електричними і пружними параметрами досліджених ущільнених порід.

Ключові слова: алевроліти, ущільнені пісковики, питомий електричний опір, відносний електричний опір, швидкість пружних хвиль.

Постановка проблеми. Одним із результатів виконаних останнім часом геолого-геофізичних досліджень є те, що у північній прибортовій зоні Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) було виявлено значні перспективи наявності нетрадиційних покладів вуглеводнів (газ ущільнених порід, сланцевий газ, сланцева нафта), які можуть у разі перевищувати ресурси традиційного типу (Михайлов та ін., 2014). Ущільнені породи складають покривки над колекторами, що містять вуглеводні. Вони у деяких районах містять значну кількість органіки й можуть слугувати колекторами газу. У зв'язку з розвитком новітніх технологій видобутку газу встановлено, що з багатих органікою ущільнених порід можна добувати газ у значних обсягах, з економічно прийнятною за нинішніх умов собівартістю.

Основа ефективної технології виділення й оцінки газонасичених ущільнених порід становить буріння горизонтальних свердловин, орієнтованих у напрямку, перпендикулярному

мінімальній горизонтальній напрузі порід, і проведення гідророзриву в продуктивному інтервалі геологічного розрізу. Важливою частиною технології є геофізичні та петрофізичні дослідження, а також математичне моделювання, на основі яких визначаються напрямки горизонтального стовбура свердловини гідророзриву і його параметри.

Ущільнені породи, петрофізичні властивості яких наведені у даній статті, представлені низькопористими пісковиками й алевролітами. Характеристика електричних і пружних властивостей цих порід є одним із важливих засобів оцінки нафтогазового потенціалу перспективних товщ ущільнених колекторів, що зумовлює актуальність їх петрофізичного вивчення.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Вивченню фізичних параметрів порід газонафтоперспективних районів України присвячений ряд публікацій (Вижва та ін., 2012, 2013, 2014, 2017 – 2021; Vyzhva et al., 2017;

Карпенко та ін., 2014, 2015; Маслов та ін., 2017; Михайлов та ін., 2014; Орлюк, 2013; Orlyuk, 2018; Рибалка та Карпенко, 2016; Соболев та Карпенко, 2021; Садівник, 2013 та багатьох інших авторів). Електричні й акустичні властивості порід мають важливе значення для оцінки їх колекторських властивостей за даними електрометричних та акустичних методів досліджень свердловин. При цьому петрофізичні характеристики порід і їх кореляційні зв'язки з фільтраційно-ємнісними параметрами мають досить виражений індивідуальний характер щодо кожної ділянки досліджень. Тому лабораторне визначення цих властивостей та встановлення відповідних кореляційних зв'язків між ними для кожної перспективної площі потребують виконання як окремих досліджень, так і окремого публічного висвітлення їх результатів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Проблема пошуків та вивчення нетрадиційних джерел вуглеводнів на території України є очевидною і актуальною. З метою оцінки перспективності на газ геологічних структур і комплексів окрім геолого-геометричних та економічних параметрів важливе значення мають петрофізичні властивості гірських порід (у т. ч. електричні та пружні). Ці дані необхідно враховувати для оцінки колекторських властивостей порід за матеріалами електрометричних та акустичних методів досліджень пошуково-розвідувальних свердловин. Незважаючи на велику кількість публікацій, для ряду ущільнених порід-колекторів практично відсутні дані результатів їх лабораторних фільтраційно-ємнісних, електрометричних, акустичних досліджень та їхніх кореляційних залежностей з фільтраційно-ємнісними параметрами. Окрім того, петрофізичні дослідження до недавнього часу були направлені переважно на вивчення порід-колекторів традиційних джерел вуглеводнів і на даному етапі петрофізичні параметри ущільнених порід є маловивченими або зовсім невивченими.

Мета досліджень. Метою наших досліджень була оцінка електричних та акустичних властивостей ущільнених теригенних порід карбону нетрадиційних джерел вуглеводнів перспективних ділянок східної частини північної прибортової зони ДДЗ, як основи комплексного аналізу їх фізичних параметрів та встановлення кореляційних зв'язків з фільтраційно-ємнісними властивостями. Кореляційні зв'язки між ємнісно-фільтраційними характеристиками і даними свердловинних та польових геофізичних методів є досить складними і потребують ретельного вивчення. Основою для визначення цих зв'язків є комплекс лабораторних петрофізичних досліджень. Дані, отримані в результаті лабораторних досліджень фільтраційно-ємнісних параметрів і густини порід, їх питомого електричного опору, швидкості поширення пружних хвиль у них та кореляційні зв'язки цих петрофізичних характеристик, використовуються для інтерпретації результатів електрометричних і акустичних методів досліджень свердловин, польової електророзвідки й сейсморозвідки.

Експериментальні дослідження виконані в НДЛ теоретичної та прикладної геофізики ННІ "Інститут геології" КНУ імені Тараса Шевченка. Комплекс петрофізичних досліджень включав визначення: густини порід; відкритої та ефективно пористості; структури капілярного простору; питомого електричного опору; швидкості пружних хвиль в атмосферних і пластових умовах (Вижва та ін., 2021). Виконано також петрографічні дослідження. Усі лабораторні вимірювання виконувалися відповідно до чинних нормативних документів.

У даній статті наведено результати комплексних досліджень електричних та акустичних властивостей колекції із 71 зразка ущільнених теригенних порід карбону (пісковиків і алевролітів) східної частини північної прибортової зони ДДЗ, відібраних на пошукових площах: Аксютівська (інт. глиб. 3905–4033 м); Гашинівська (інт. глиб. 3398–3404 м); Дружелюбівська (інт. глиб. 2852–2857 м); Євгенівська (інт. глиб. 1109–1419 м); Наріжнська (інт. глиб. 3359–4186 м); Островецька (інт. глиб. 3780–4572 м).

Методика електрометричних та акустичних досліджень. Лабораторні електрометричні вимірювання сухих зразків керна виконані за температури 20 °С цифровим тераомметром С.А.6547, який дозволяє виконувати високоточні вимірювання електричного опору на постійному струмі за двоелектродною схемою в діапазоні від 10 кОм до 10 ТОм із цифровим записом результатів вимірювань на ЕОМ за спеціальною програмою (Вижва та ін., 2012 – 2014; Vyzhva et al., 2017). Для вимірювання зразків, насичених моделлю пластової води (розчин NaCl, мінералізація 180 г/л), застосовувався RCL-метр МНС-1100. Циліндричні зразки під час вимірювання розташовувались у спеціальному кернотримачі, розробленому в НДЛ теоретичної та прикладної геофізики.

Розв'язання задач інверсії даних сейсморозвідки й акустичного каротажу у фільтраційно-ємнісні параметри неможливе без надійної прив'язки цих даних до петрофізичних характеристик. Для лабораторних вимірювань швидкостей поширення пружних хвиль у гірських породах застосовано імпульсно-фазовий ультразвуковий метод (Продайвода, 2004, 2007). Лабораторні акустичні дослідження виконані за допомогою установки "Керн-4", розробленої в НДЛ теоретичної та прикладної геофізики разом із співробітниками механіко-математичного факультету КНУ імені Тараса Шевченка. Вимірювання швидкості пружних хвиль здійснювалося на спеціально виготовлених лабораторних зразках, орієнтованих уздовж на шарування.

З метою визначення залежності петрофізичних параметрів від водонасичення порід, досліджені зміни питомого електричного опору й швидкості пружних хвиль за різного ступеня відгонки води на центрифугі ОС-6М (Породы..., 1985; Рудько, 2005). У процесі цих досліджень виконана серія вимірювань електричного опору й швидкості пружних хвиль зразків порід, насичених моделлю пластової води, до їх центрифугування та після центрифугування за режимів відгонки від 1000 до 6000 об/хв із кроком 1000 об/хв, що відповідає діапазону зміни тиску витіснення води від 0 до 1,2 МПа (7 циклів вимірювань). Паралельно визначалися також коефіцієнти водонасичення.

Для встановлення кореляційного зв'язку між електричними та швидкісними параметрами порід в атмосферних і пластових умовах виконаний відповідний комплекс лабораторних петрофізичних досліджень у змодельованих пластових умовах (температура $t=94-126$ °С; ефективний тиск $p_{\text{эф}}=41-55$ МПа; мінералізація пластової води $M=180$ г/л).

Середня відносна похибка визначення електричного опору порід у рамках виконаних досліджень склала 3,4 %, а швидкості пружних хвиль – 2,2 %.

Аналіз даних електрометричних досліджень. Лабораторними вимірюваннями визначено електричні параметри ущільнених порід-колекторів нетрадиційних джерел вуглеводнів перспективних ділянок північної прибортової зони ДДЗ, дані про межі змін та середні значення яких наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Межі змін і середні значення електричних параметрів порід

№	Породи	Значення параметра	Атмосферні умови			Пластові умови	
			Питомий електричний опір, Ом·м		Відносний електричний опір, Р	Питомий електричний опір порід, насичених розчином NaCl, Ом·м	Відносний електричний опір, Р _{пл}
			сухих	насичених розчином NaCl			
1	Алевроліти	мін.	6522	3,3	41,2	0,4	132
		макс.	2781844	26,8	277,9	7,7	2480
		сер.	1033161	8,5	96,2	2,1	562
2	Пісковики	мін.	16180	2,9	34,0	0,4	81
		макс.	206815014	20,3	238,5	3,5	953
		сер.	27973188	8,2	94,5	1,3	339

У результаті виконаних лабораторних електрометричних вимірювань в атмосферних умовах встановлено, що питомий електричний опір сухих екстрагованих зразків (питомий електричний опір мінерального скелета) змінюється: для алевролітів – від 6,522 кОм·м (алевроліт дрібнозернистий світло-сірий) до 2,782 МОм·м (алевроліт сірий) за середнього значення 1,033 МОм·м; для пісковиків – від 16,18 кОм·м (піскови́к дрібнозернистий смугастий) до 206,815 МОм·м (піскови́к світло-сірий крупнозернистий (гравеліт) з кременистим цементом) за середнього значення 27,973 МОм·м. Питомий електричний опір зразків порід, насичених моделлю пластової рідини (розчин NaCl), змінюється: для алевролітів – від 3,3 Ом·м (алевроліт зеленувато-сірий з сидеритом) до 26,8 Ом·м (алевроліт глинистий) за середнього значення 8,5 Ом·м; для пісковиків – від 2,9 Ом·м (піскови́к середньозернистий світло-сірий кварцовий) до 20,3 Ом·м (піскови́к дрібнозернистий світло-сірий кварцовий) за середнього значення 8,2 Ом·м.

Важливим інформаційним параметром є відносний електричний опір порід (Р) – відношення питомого опору

повністю насиченої породи ($\rho_{\text{пв}}$) до питомого опору насичувального розчину ($\rho_{\text{в}}$): $R = \rho_{\text{пв}} / \rho_{\text{в}}$ (Дахнов, 1975; Туаб і Доналдсон, 2009). Аналіз електрометричних даних дозволив установити, що відносний електричний опір порід змінюється: для алевролітів – від 41,2 (алевроліт світло-сірий тонкосму́гастий) до 277,9 (алевроліт глинистий) за середнього значення 96,2; для пісковиків – від 34,0 (піскови́к середньозернистий світло-сірий кварцовий) до 238,5 (піскови́к дрібнозернистий світло-сірий кварцовий) за середнього значення 94,5.

Побудовані кореляційні залежності між коефіцієнтом пористості (k_n) і відносним електричним опором (Р), яка має вигляд $R = a \cdot k_n^{-m}$, де a – постійний коефіцієнт, m – структурний показник (Дахнов, 1975; Туаб і Доналдсон, 2009). Отримані кореляційні залежності описуються степеневими рівняннями:

$$R = 3,1494 \cdot k_n^{-0,914}, \text{ при } R^2 = 0,97 \text{ – алевроліти;}$$

$$R = 3,2344 \cdot k_n^{-0,991}, \text{ при } R^2 = 0,81 \text{ – пісковики.}$$

Графіки цих залежностей наведено на рис. 1, 2.

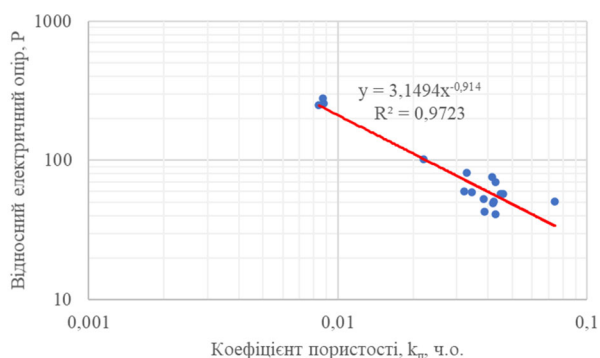


Рис. 1. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості (k_n) та відносним електричним опором (Р) алевролітів

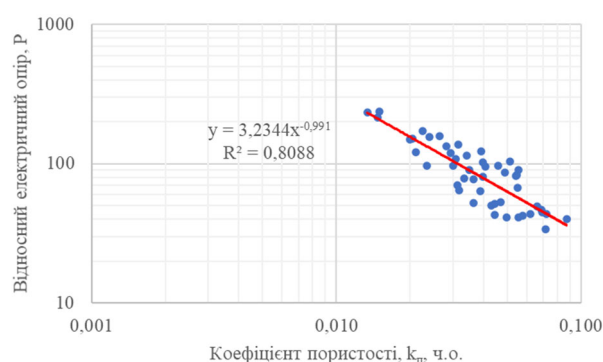


Рис. 2. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості (k_n) та відносним електричним опором (Р) ущільнених пісковиків

Досить важливою інформаційною характеристикою порід-колекторів є параметр збільшення електричного опору (R_n), який являє собою відношення питомого опору частково водонасичених порід ($\rho_{\text{пв}}$) до питомого опору повністю водонасичених порід ($\rho_{\text{пв}}$): $R_n = \rho_{\text{пв}} / \rho_{\text{пв}}$. Експериментальними лабораторними дослідженнями на центрифугі ОС-6М і статистичним аналізом даних електрометричних вимірювань було отримано кореляційні залежності параметра R_n від коефіцієнта водонасичення ($k_{\text{в}}$), які мають вигляд $R_n = b \cdot k_{\text{в}}^{-n}$, де b – постійний коефіцієнт, n – показник змочуваності, що залежить від ступеня гідрофобності зерен породи (Дахнов, 1975; Туаб і Доналдсон, 2009), описуються степеневими рівняннями і для досліджених порід записуються у вигляді

$$R_n = 0,9873 \cdot k_{\text{в}}^{-3,071} \text{ при } R^2 = 0,75 \text{ – алевроліти;}$$

$$R_n = 1,1122 \cdot k_{\text{в}}^{-1,472} \text{ при } R^2 = 0,9 \text{ – ущільнені пісковики.}$$

Графіки цих залежностей наведено на рис. 3, 4.

Для оцінки питомого й відносного електричного опору порід у пластових умовах виконано комплексні дослідження на спеціальній установці високого тиску ВСЦ-1000. Вимірювання виконувались на зразках, насичених розчином NaCl. Межі змін і середні значення питомого й відносного електричного опору порід у пластових умовах (температура $t=94-126$ °С; ефективний тиск $p_{\text{еф}}=41-55$ МПа; мінералізація пластової води $M=180$ г/л) наведено в табл. 1.

Вимірювання електричних параметрів порід у разі зміни тиску від атмосферного до пластового показало, що їх питомий електричний опір із збільшенням тиску зростає, що пояснюється закриттям мікротріщин у породах та деформацією в них порового простору. Однак якщо збільшується температура від атмосферної до пластової, то опір порід зменшується. Отже, маємо суперпозицію впливу двох різнонаправлених факторів на питомий електричний опір порід у пластових умовах.

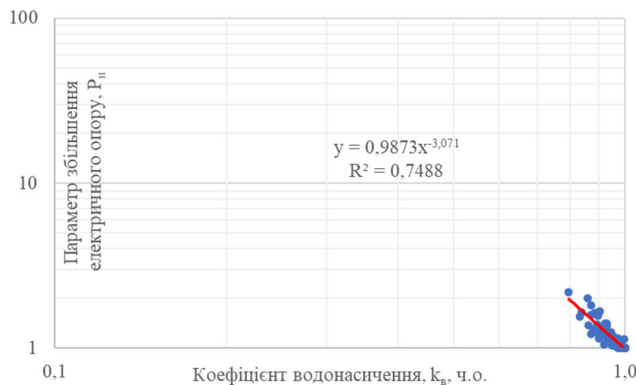


Рис. 3. Кореляційна залежність між параметром збільшення електричного опору (P_n) та коефіцієнтом водонасичення (k_w) алевролітів

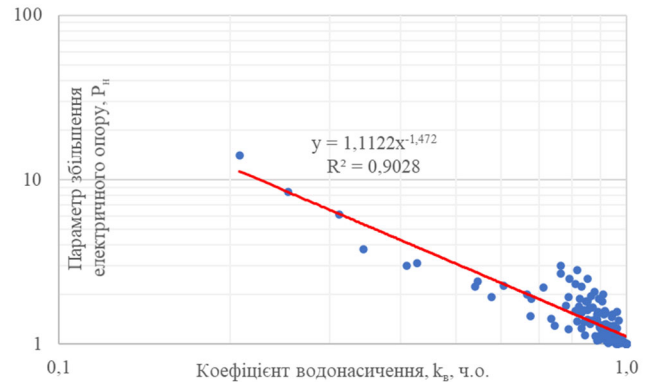


Рис. 4. Кореляційна залежність між параметром збільшення електричного опору (P_n) та коефіцієнтом водонасичення (k_w) ущільнених пісковиків

За результатами фізичного моделювання встановлено, що питомий електричний опір алевролітів у пластових умовах змінюється від 0,4 Ом·м до 7,7 Ом·м за середнього значення 2,1 Ом·м, а пісковиків – від 0,4 Ом·м до 3,5 Ом·м за середнього значення 1,3 Ом·м (табл. 1). Відносний електричний опір алевролітів у пластових умовах змінюється від 132 до 2480 за середнього значення 562, а пісковиків – від 81 до 953 за середнього значення 339 (табл. 1).

Комплексний аналіз даних лабораторних електрометричних вимірювань дозволив отримати для досліджених порід кореляційні залежності між питомими електричними опорами в атмосферних (ρ) і пластових ($\rho_{пл}$) умовах (рис. 5, 6), між відносними електричними опорами в атмосферних (P) і пластових ($P_{пл}$) умовах (рис. 7, 8) та між відносними електричними опорами ($P_{пл}$)

і коефіцієнтами пористості ($k_{п,пл}$) у пластових умовах (рис. 9, 10). Аналітичні вирази цих залежностей наведено нижче:

$$\rho_{пл} = 0,3008 \cdot \rho - 0,4365, \text{ при } R^2 = 0,94 - \text{ алевроліти};$$

$$\rho_{пл} = 0,1767 \cdot \rho - 0,1802,$$

$$\text{при } R^2 = 0,97 - \text{ ущільнені пісковики};$$

$$P_{пл} = 10,456 \cdot P - 324,8, \text{ при } R^2 = 0,96 - \text{ алевроліти};$$

$$P_{пл} = 3,9949 \cdot P - 38,429,$$

$$\text{при } R^2 = 0,97 - \text{ ущільнені пісковики};$$

$$P_{пл} = 1,6324 \cdot k_{п,пл}^{-1,503}, \text{ при } R^2 = 0,82 - \text{ алевроліти};$$

$$P_{пл} = 6,3829 \cdot k_{п,пл}^{-1,124}, \text{ при } R^2 = 0,85 - \text{ ущільнені пісковики}.$$

Залежності між питомими та відносними електричними опорами в атмосферних і пластових умовах для досліджених порід виражаються лінійними функціями (рис. 5–8), а між відносними електричними опорами і коефіцієнтами пористості – степеневими функціями (рис. 9–10).

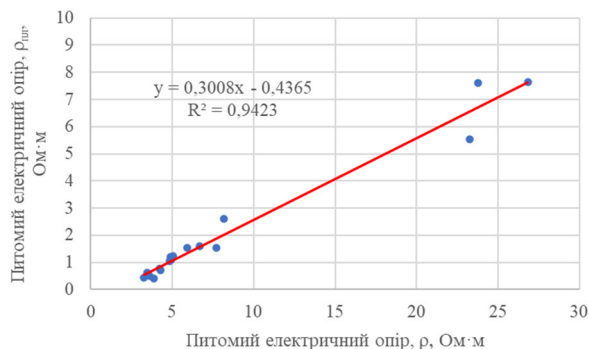


Рис. 5. Кореляційна залежність між питомим електричним опором алевролітів в атмосферних (ρ) і пластових ($\rho_{пл}$) умовах

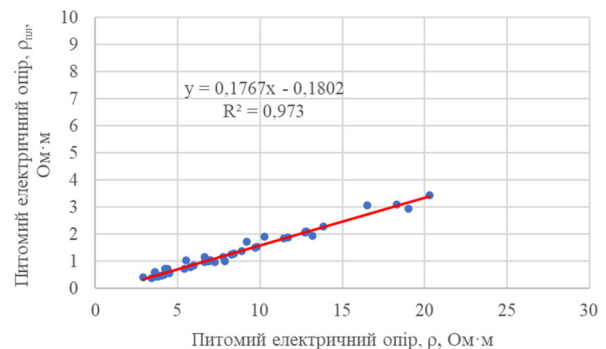


Рис. 6. Кореляційна залежність між питомим електричним опором щільних пісковиків в атмосферних (ρ) і пластових ($\rho_{пл}$) умовах

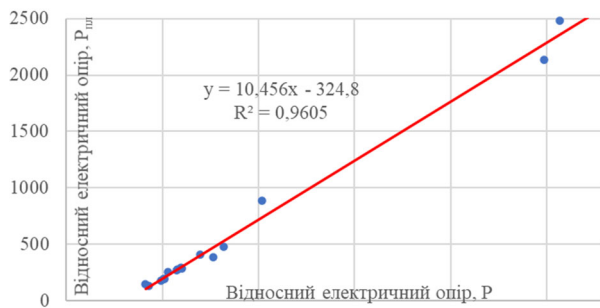


Рис. 7. Кореляційна залежність між відносним електричним опором алевролітів в атмосферних (P) і пластових ($P_{пл}$) умовах

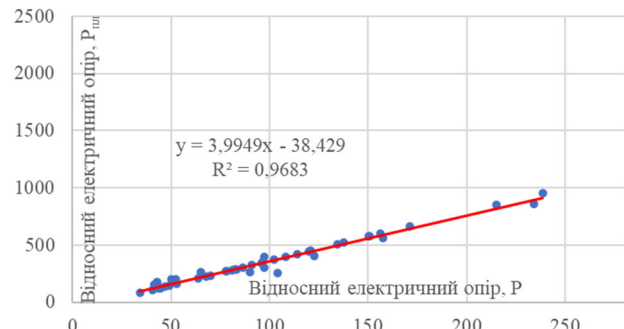


Рис. 8. Кореляційна залежність між відносним електричним опором ущільнених пісковиків в атмосферних (P) і пластових ($P_{пл}$) умовах

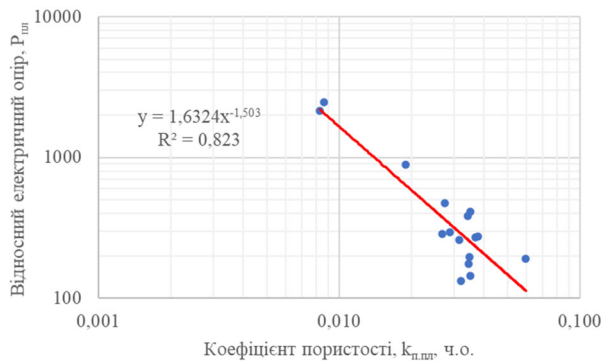


Рис. 9. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ($k_{п.пл}$) й відносним електричним опором ($P_{пл}$) алевролітів (пластові умови)

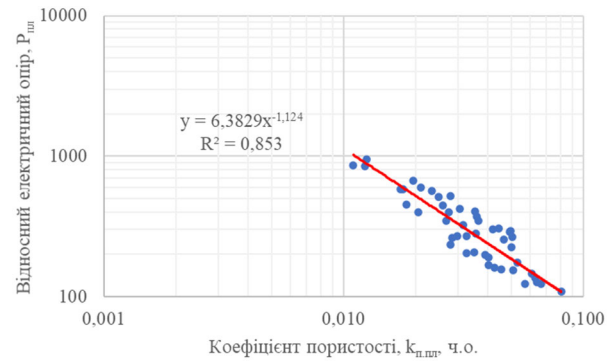


Рис. 10. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ($k_{п.пл}$) й відносним електричним опором ($P_{пл}$) ущільнених пісковиків (пластові умови)

Наведені вище кореляційні залежності, графіки яких представлено на рис. 5–10, дозволяють оцінювати електричні параметри порід, що перебувають у пластових умовах, за результатами лабораторного визначення їх в атмосферних умовах.

Аналіз даних акустичних досліджень. Під час лабораторних петрофізичних досліджень в атмосферних

і змодельованих пластових умовах проведений комплекс акустичних вимірювань швидкостей поширення пружних хвиль в ущільнених породах – алевролітах і низькопористих пісковиках північної прибортової зони ДДЗ. Результати зазначених акустичних досліджень наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Межі змін і середні значення швидкостей поздовжніх пружних хвиль досліджених порід					
№	Породи	Значення параметра	Атмосферні умови		Пластові умови
			Швидкість поздовжніх хвиль, м/с		Швидкість поздовжніх хвиль, м/с
			сухих	насичених розчином NaCl	насичених розчином NaCl
1	Алевроліти	мін.	2616	3596	3763
		макс.	4706	5438	6223
		сер.	3940	4681	5053
2	Пісковики	мін.	3660	4302	4430
		макс.	4971	5463	5752
		сер.	4245	4942	5176

У результаті аналізу даних лабораторних акустичних вимірювань в атмосферних умовах встановлено, що в екстрагованих сухих алевролітах швидкість поширення поздовжніх пружних хвиль змінюється від 2616 м/с (алевроліт зеленувато-сірий із сидеритом) до 4706 м/с (алевроліт глинистий) при середньому значенні 3940 м/с, а пісковиків – від 3660 м/с (піскови́к світло-сірий крупнозернистий кварцовий) до 4971 м/с (піскови́к середньозернистий кварцовий світло-сірий) при середньому значенні 4245 м/с.

В алевролітах, насичених моделлю пластової води (розчин NaCl), цей параметр змінюється від 3596 м/с до 5438 м/с при середньому значенні 4681 м/с, а в пісковиках – від 4302 м/с до 5463 м/с при середньому значенні 4942 м/с.

За результатами сейсмоакустичних досліджень в атмосферних умовах встановлено ряд кореляційних залежностей між швидкостями пружних хвиль (V_p) і коефіцієнтом пористості (k_p) та густиною досліджених порід (δ), насичених розчином NaCl, графіки яких зображено на рис. 11–14. Аналітичні вирази цих залежностей наведено нижче:

$$V_p = -25310 \cdot k_p + 5539, \text{ при } R^2 = 0,84 \text{ – алевроліти;}$$

$$V_p = -13937 \cdot k_p + 5506,1,$$

$$\text{при } R^2 = 0,75 \text{ – ущільнені пісковики;}$$

$$V_p = 6,3707 \cdot \delta - 12001, \text{ при } R^2 = 0,75 \text{ – алевроліти;}$$

$$V_p = 5,7252 \cdot \delta - 9939,4,$$

$$\text{при } R^2 = 0,74 \text{ – ущільнені пісковики.}$$

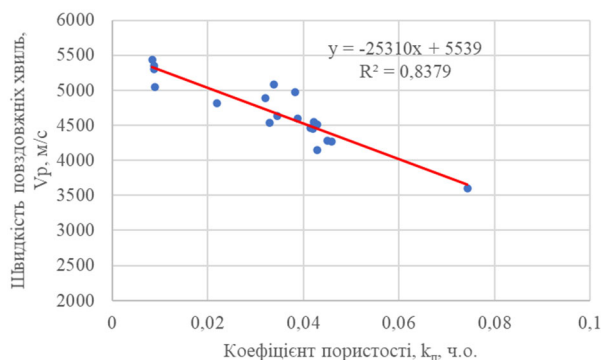


Рис. 11. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості (k_p) алевролітів і швидкістю поздовжніх хвиль (V_p)

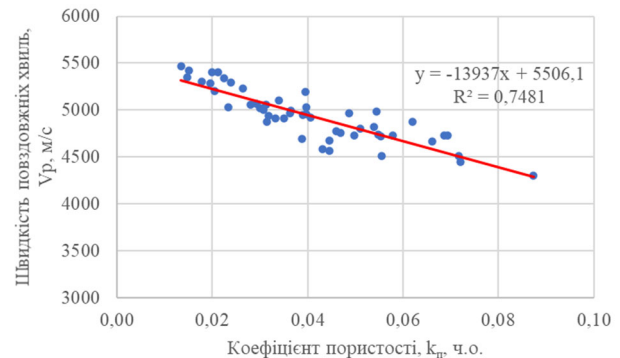


Рис. 12. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості (k_p) пісковиків і швидкістю поздовжніх хвиль (V_p)

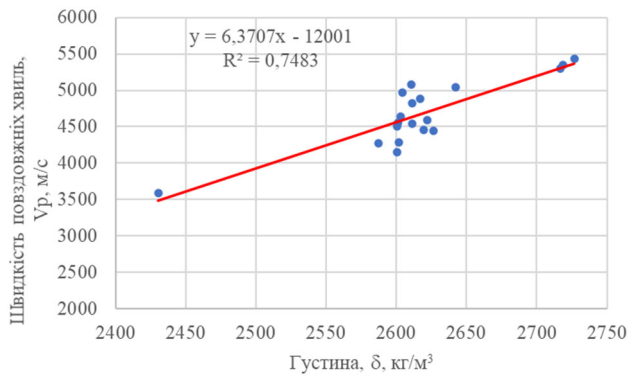


Рис. 13. Кореляційна залежність між густиною (δ) алеволітів і швидкістю позовдовжніх хвиль (V_p)

Акустичні дослідження швидкості поширення позовдовжніх хвиль у пластових умовах $V_{p,пл}$ проведені комплексні дослідження на спеціальній установці високого тиску ВСЦ-1000. Вимірювання виконувалися на зразках, насичених розчином NaCl. Межі змін та середні значення $V_{p,пл}$ порід у пластових умовах наведені в табл. 2. За результатами лабораторних акустичних вимірювань під час фізичного моделювання пластових умов встановлено, що швидкість позовдовжніх хвиль у досліджених породах зростає із збільшенням тиску, внаслідок закриття в них мікротріщин та деформації порового простору, і загалом змінюється: для алеволітів – від 3763 м/с до 6223 м/с за середнього значення 5053 м/с; для пісковиків – від 4430 м/с до 5752 м/с за середнього значення 5176 м/с. Кореляційна залежність зростання швидкості позовдовжніх хвиль від тиску описується поліномом 2 порядку.

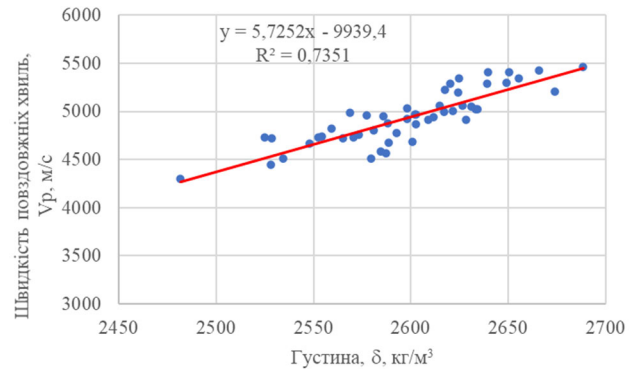


Рис. 14. Кореляційна залежність між густиною (δ) пісковиків і швидкістю позовдовжніх хвиль (V_p)

Комплексний аналіз даних лабораторних акустичних досліджень дозволив отримати для досліджених порід кореляційні зв'язки між швидкостями позовдовжніх хвиль в атмосферних і пластових умовах (рис. 15, 16) та між коефіцієнтами пористості ($k_{п,пл}$) й швидкістю пружних хвиль ($V_{p,пл}$) у пластових умовах (рис. 17, 18), які виражаються лінійними функціями. Аналітичні вирази цих залежностей наведені нижче:

$$V_{p,пл} = 1,2806 \cdot V_p - 937,55, \text{ при } R^2 = 0,95 - \text{ алеволіти;}$$

$$V_{p,пл} = 1,0556 \cdot V_p - 39,901, \text{ при } R^2 = 0,95 - \text{ ущільнені пісковики;}$$

$$V_{p,пл} = -33006 \cdot k_{п,пл} + 5874,7, \text{ при } R^2 = 0,77 - \text{ алеволіти;}$$

$$V_{p,пл} = -16384 \cdot k_{п,пл} + 5775,7, \text{ при } R^2 = 0,78 - \text{ ущільнені пісковики.}$$

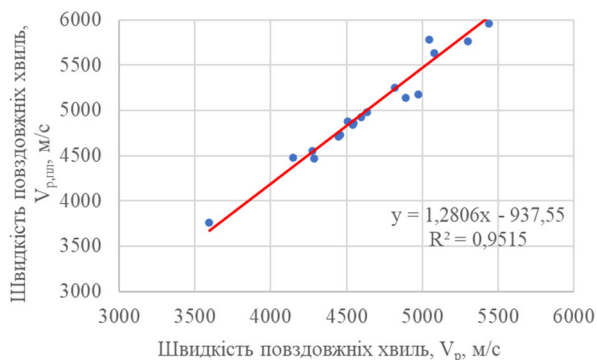


Рис. 15. Кореляційна залежність між швидкістю позовдовжніх хвиль в атмосферних (V_p) і пластових ($V_{p,пл}$) умовах. Алеволіти

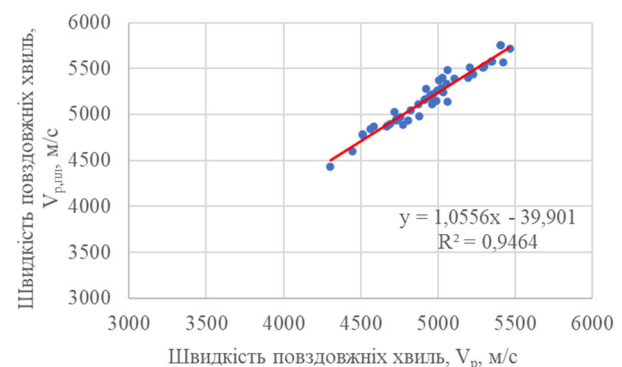


Рис. 16. Кореляційна залежність між швидкістю позовдовжніх хвиль в атмосферних (V_p) і пластових ($V_{p,пл}$) умовах. Пісковики

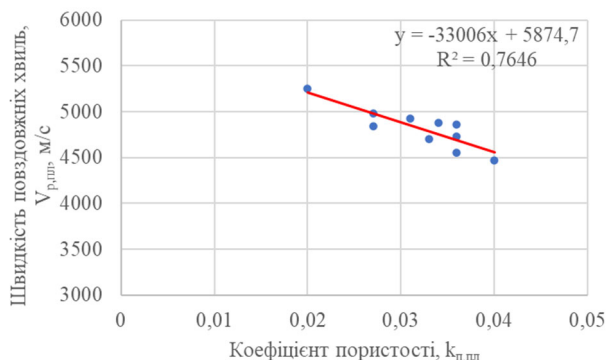


Рис. 17. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ($k_{п,пл}$) й швидкістю позовдовжніх хвиль ($V_{p,пл}$) (пластові умови). Алеволіти

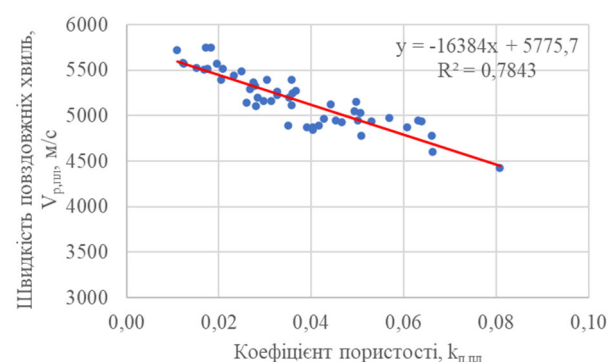


Рис. 18. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ($k_{п,пл}$) й швидкістю позовдовжніх хвиль ($V_{p,пл}$) (пластові умови). Пісковики

Висновки. У статті наведено результати комплексних досліджень петрофізичних властивостей колекції із 71 зразка ущільнених порід (пісковиків і алевролітів), відібраних на 6 пошукових площах північного борту ДДЗ в інтервалах глибин від 1100 м до 4500 м.

За результатами лабораторних електрометричних вимірювань в атмосферних умовах встановлено, що значення питомого електричного опору сухих екстрагованих зразків порід (питомий електричний опір мінерального скелета) змінюється: для алевролітів – від 6,522 кОм·м до 2,782 МОм·м (середнє значення 1,033 МОм·м); для пісковиків – від 16,18 кОм·м до 206,815 МОм·м (середнє значення 27,973 МОм·м). При цьому спостерігаються значні варіації питомого опору зразків, що пояснюється неоднорідностями в текстурі порід (нааявністю глинистих і піщаних прошарків та їх неупорядкованістю). Питомий електричний опір порід, насичених моделлю пластової рідини, змінюється: для алевролітів – від 3,3 Ом·м до 26,8 Ом·м (середнє 8,5 Ом·м); для пісковиків – від 2,9 Ом·м до 20,3 Ом·м (середнє значення 8,2 Ом·м). Варто відмітити, що за середніми значеннями опорів, породи насичені моделлю пластової води, практично не відрізняються. У той же час за питомим електричним опором мінерального скелета алевроліти і пісковики суттєво відрізняються.

Петрофізичними дослідженнями визначено відносний електричний опір порід в атмосферних умовах. Отримані дані показали, що відносний електричний опір змінюється: для алевролітів – від 41,2 до 277,9 (середнє 96,2); для пісковиків – від 34,0 до 238,5 (середнє 94,5).

На основі проведених досліджень залежності параметра збільшення електричного опору від коефіцієнта водонасичення встановлено відповідний кореляційний зв'язок, який виражається степеневою функцією.

Фізичне моделювання пластових умов дозволило встановити, що в цих умовах питомий електричний опір змінюється: для алевролітів – від 0,4 Ом·м до 7,7 Ом·м (середнє 2,1 Ом·м); для пісковиків – від 0,4 Ом·м до 3,5 Ом·м (середнє 1,3 Ом·м). Вимірювання питомого опору порід при різних тисках показали, що внаслідок закриття мікротріщин та деформації порового простору електричний опір порід зростає із збільшенням тиску, при цьому залежність коефіцієнта збільшення питомого електричного опору від тиску для досліджених порід виражається поліномом 2 порядку.

Дослідженнями відносного електричного опору порід у пластових умовах встановлено, що цей параметр змінюється: для алевролітів – від 132 до 2480 (середнє 562); для пісковиків – від 81 до 953 (середнє 339).

У результаті комплексного аналізу матеріалів електрометричних досліджень для порід встановлено кореляційні зв'язки між питомим електричним і відносним електричним опором, а також між коефіцієнтом пористості й відносним електричним опором в атмосферних і пластових умовах. Залежність між питомим та відносним електричним опором в атмосферних і пластових умовах для досліджених порід виражається лінійною функцією. Фізичне моделювання пластових умов дозволяє адаптувати значення електричних параметрів, отриманих під час лабораторних вимірювань в атмосферних умовах, до параметрів порід, що перебувають у пластових умовах.

У результаті акустичних досліджень в атмосферних умовах встановлено, що швидкість поширення поздовжніх хвиль, насичених моделлю пластової води, змінюється: для алевролітів – від 3596 м/с до 5438 м/с (середнє 4681 м/с); для пісковиків – від 4302 м/с до

5463 м/с (середнє 4942 м/с). У сухих екстрагованих алевролітах швидкість поздовжніх хвиль має діапазон зміни від 2616 м/с до 4706 м/с (середнє 3940 м/с), а в пісковиках – від 3660 м/с до 4971 м/с (середнє 4245 м/с).

Фізичним моделюванням пластових умов встановлено, що швидкість поздовжніх хвиль змінюється: для алевролітів – від 3763 м/с до 6223 м/с (середнє 5053 м/с); для пісковиків – від 4430 м/с до 5752 м/с (середнє 5176 м/с). Із збільшенням тиску швидкість поздовжніх хвиль зростає, унаслідок закриття мікротріщин і деформації порового простору. Залежність збільшення швидкості від тиску описується поліномом 2 порядку.

У результаті комплексного аналізу матеріалів акустичних досліджень для алевролітів і пісковиків встановлено кореляційні зв'язки: між швидкостями пружних хвиль і густиною та коефіцієнтом пористості в атмосферних умовах; між швидкостями поздовжніх хвиль в атмосферних і пластових умовах; між швидкістю й коефіцієнтом пористості в пластових умовах. Залежність між швидкістю поздовжніх хвиль в атмосферних і пластових умовах для досліджених порід виражається лінійною функцією. Фізичне моделювання пластових умов дозволяє адаптувати значення акустичних параметрів, отриманих під час лабораторних вимірювань в атмосферних умовах, до параметрів порід, що перебувають у пластових умовах.

Кореляційні зв'язки електричних й акустичних параметрів із фільтраційно-ємнісними властивостями алевролітів і щільних пісковиків, отримані за результатами лабораторних петрофізичних досліджень, можуть бути основою для попередньої інтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин на нових перспективних площах північної прибортової зони ДДЗ.

Робота виконана в рамках держбюджетної теми №21БП049-01.

Автори висловлюють щире подяку ст. лаборанту В.С. Цуману за його активну й високопрофесійну участь у підготовці зразків і лабораторних дослідженнях.

Список використаних джерел

- Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онишук, Д.І., Онишук, І.І. (2013). Петрофізичні параметри нетрадиційних порід-колекторів Південного нафтогазового регіону. *Геоінформатика*, 3 (47), 1–9.
- Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онишук, Д.І., Онишук, І.І. (2014). Електричні параметри порід-колекторів імпактних структур. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 65, 31–35.
- Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онишук, Д.І., Онишук, І.І. (2014). Петрофізичні параметри порід, перспективних на сланцевий газ (ділянки східного сектору Дніпровсько-Донецької западини). *Геофизический журнал*, 36, 1, 145–157.
- Вижва, С.А., Онишук, В.І., Онишук, І.І., Орлюк, М.І., Друкаренко, В.В., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2019). Петрофізичні параметри порід візейського ярусу Лохвицької зони Дніпровсько-Донецької западини. *Геофизический журнал*, 41, 4, 145–160.
- Вижва, С.А., Онишук, В.І., Онишук, І.І., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2018). Фільтраційно-ємнісні особливості порід верхнього карбону (на прикладі Руновщинської площі ДДЗ). *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 83, 30–37.
- Вижва, С.А., Онишук, В.І., Онишук, І.І., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2019). Електричні параметри порід верхнього карбону Руновщинської площі ДДЗ. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 85, 37–45.
- Вижва, С.А., Онишук, В.І., Онишук, І.І., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2020). Електричні та акустичні параметри нижньопермських карбонатних порід західної частини Глинсько-Солохівського газонафтоносного району ДДЗ. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3 (94), 37–45. DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.94.04>.
- Вижва, С.А., Онишук, В.І., Онишук, І.І., Рева, М.В., Шабатура, О.В., Олійник, О.В. (2020). Фільтраційно-ємнісні параметри нижньопермських карбонатних порід західної частини Глинсько-Солохівського нафтогазового району Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського*

національного університету імені Тараса Шевченка. *Геологія*, 1 (88), 25–33. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.04>.

Вижва, С.А., Онишчук, Д.І., Онишчук, В.І. (2012). Петроелектрична модель порід-колекторів Західно-Шебелинського газоконденсатного родовища. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 57, 13–16.

Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онишчук, І.І. (2017). Петрофизические особенности пород майкопской серии Крымско-Черноморского региона. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 79, 12–20.

Дахнов, В.Н. (1975). Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения пород. Недр, 343 с.

Карпенко, О., Башкіров, Г., Карпенко, І. (2014). Визначення вмісту органічної речовини в гірських породах за геофізичними даними. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(66), 71–76. DOI: 10.17721/1728-2713.66.12

Карпенко, О.М., Михайлов, В.А., Карпенко, І.О. (2015). До прогнозу освоєння вуглеводневих ресурсів східної частини ДДЗ. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 68, 49–54.

Маслов, Б.П., Онишчук, І.І., Шинкаренко, А.В. (2017). Моделювання нелінійних в'язко-пружних властивостей терригенно-вапняковистих пісковиків *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 77, 99–105. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.77.13>.

Михайлов, В.А., Вижва, С.А., Загнітко, В.М. та ін. (2014). Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. Східний нафтогазоносний регіон: аналітичні дослідження. Книга IV. ВПЦ "Київський університет", 430 с.

Орлюк, М.І., Друкаренко, В.В. (2013). Физические параметры пород осадочного чехла северо-западной части Днепровско-Донецкой впадины. *Геофизический журнал*, 35, 2, 127–136.

Породы горные. (1985). Методы определения коллекторских свойств. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации: ГОСТ 26450.2-85. Москва: Миннео СССР, 18 с.

Продайвода, Г.Т. (2004). Акустика текстур гірських порід. Київ: ВГЛ "Обрії", 144 с.

Продайвода, Г.Т. (2007). Математичне моделювання ефективних термомеханічних властивостей багатокомпонентного тріщинуватого геологічного середовища насиченого флюїдом з внутрішнім тиском. *Геофизический журнал*, 3, 122–130.

Рибалка, С., Карпенко, О. (2016). Колекторські властивості терригенних порід на великих глибинах центральної частини Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(72), 56–59. DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2713.72.08>

Рудько, Г.І., Нестеренко, М.Ю. та ін. (2005). Обґрунтування кондиційних значень фільтраційно-ємнісних параметрів терригенних порід-колекторів для підрахунку запасів вуглеводнів. Методичні вказівки. Київ-Львів, 58 с.

Садівник, М.І., Федоришин, Д.Д., Трубенко, С.Д., Федоришин, С.Д. (2013). Вплив пластового тиску на електричні параметри гірських порід. *XII Міжнародна конференція "Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти"*, Київ, Україна, (електронна публікація).

Соболь, В., Карпенко, О. (2021). Нова модель проникності терригенних гранулярних колекторів на прикладі турнейських відкладів Яблунівського нафтогазоконденсатного родовища Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1 (92), 61–66. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.09>.

Тиаб, Дж., Дональдсон, Эрл Ч. (2009). Петрофизика: теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов. "Премии Инжиниринг", 868 с.

Orlyuk, M.I., Drukarenko, V.V., Onyshchuk, I.I., Solodkyi, I.V. (2018). The association of physical properties of deep reservoirs with geomagnetic field and fault-block tectonics in the Glyns'ko-Solokhiv'skiy oil-and-gas region. *Geodinamika*, 2 (25), 71–88. DOI: <https://doi.org/10.23939/jgd2018.02.071>.

Vyzhva, S.A., Onyshchuk, V.I. & Onyshchuk, D.I. (2017). Electrical model of Cambrian rocks from Volodymyr'ska area in Volyno-Podillia (Ukraine) *Nafta-Gaz. Rok LXXIII*, Nr 2, 90–96. DOI: 10.18668/NG.2017.02.03

Reference

Dakhnov, V.N. (1975). Geophysical methods for the determination of reservoir properties and oil and gas saturation of rocks. Moscow: Nedra. [in Russian]

Karpenko, O., Bashkurov, G., Karpenko, I. (2014). Geophysical data: Estimating organic matter in rocks. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(66), 71–76. DOI: 10.17721/1728-2713.66.12 [in Ukrainian]

Karpenko, O., Mykhailov, V., Karpenko, I. (2015). Eastern Dnieper-Donets depression: Predicting and developing hydrocarbon resources. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 68, 49–54. [in Ukrainian]

Maslov, B., Onyshchuk, I., & Shynkarenko, A. (2017). Modelling of nonlinear viscoelastic properties of terrigenous-calcareous sandstones. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 77, 99–105. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.77.13> [in Ukrainian]

Mykhailov, V.A., Vyzhva, S.A., Zagitko, V.M., et al. (2014). Unconventional sources of hydrocarbons in Ukraine. Eastern oil-gas-bearing region: Analytical investigations. Book IV. Kyiv: Kyiv University Publishing. [in Ukrainian]

Orlyuk, M.I., Drukarenko, V.V. (2013). Physical parameters of rocks sedimentary cover of the northwestern part of the Dnieper-Donets depression. *Geophysical Journal*, 35, 2, 127–136. [in Russian]

Orlyuk, M.I., Drukarenko, V.V., Onyshchuk, I.I., Solodkyi, I.V. (2018). The association of physical properties of deep reservoirs with geomagnetic field and fault-block tectonics in the Glyns'ko-Solokhiv'skiy oil-and-gas region. *Geodinamika*, 2 (25), 71–88. DOI: <https://doi.org/10.23939/jgd2018.02.071>.

Prodayvoda, G.T. (2004). Acoustics textures of rocks. Kyiv: Horizons, 144 p. [in Ukrainian]

Prodayvoda, G.T. (2007). Mathematical modeling of effective thermoelastic properties of the multi-fractured geological environment saturated with fluid internal pressure. *Geophysical Journal*, 3, 122–130. [in Russian]

Rudko, G.I., Nesterenko, M.Yu. et al. (2005). Substantiating of the conditioning data of the reservoir parameters of terrigenous reservoirs for calculation of hydrocarbon reserves. Methodology guidelines. Kyiv-Lviv: UkrDHRI.

Rybalka, S., Karpenko, O. (2016). Central part of the Dnieper-Donets Basin: Reservoir properties of deep-laid terrigenous rocks. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(72), 56–59. DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2713.72.08> [in Ukrainian]

Sadivnik, M., Fedoryshyn, D., Trubenko, O., Fedoryshyn, S. (2013). Influence of Formation Pressure on the Electrical Characteristics of Rocks. *12th International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, Kyiv. [in Ukrainian]

Sobol, V., Karpenko, O. (2021) A new model of permeability of terrigenous granular reservoirs on the example of turney deposits of Yabluniv'ske oil and gas condensate field of the Dnieper-Donets basin. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(92), 61–66. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.09> [in Ukrainian]

Tiab, D., Donaldson, E.C. (2009). Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport. 2th Edition. Moscow: Premium Engineering. (Original work published 2004). [in Russian]

The rocks. (1985). Methods for determination of reservoir properties. Method for determination of absolute permeability coefficient under stationary and non-stationary filtration (GOST 26450.2–85). Moscow: Mingeo USSR. [in Russian]

Vyzhva, S.A., Onyshchuk, V.I., Onyshchuk, D.I. (2017). Electrical model of Cambrian rocks from Volodymyr'ska area in Volyno-Podillia (Ukraine) *Nafta-Gaz. Rok LXXIII*, Nr 2, 90–96. DOI: 10.18668/NG.2017.02.03

Vyzhva, S., Mykhailov, V., Onyshchuk, I. (2017). Petrophysical features of mai-kop series of the crimean-black sea region. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 79, 12–20. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.79.02> [in Russian]

Vyzhva, S., Mykhailov, V., Onyshchuk, D., Onyshchuk, I. (2014). Reservoir Rocks in Impact Structures: Electrical Parameters. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 65, 31–35. [in Ukrainian]

Vyzhva, S., Onyshchuk, D., Onyshchuk, V. (2012). Petroelectrical investigations of reservoir rocks of Western-Shebelynske gas condensate field. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 57, 13–16. [in Ukrainian]

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Oliinyk, O., Reva, M., Shabatura, O. (2020). Lower permian carbonate deposits reservoir parameters of western part of Hlynsko-Solohiv'ska area of Dnieper-Donets depression gas-oil-bearing district. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1 (88), 25–33. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.04> [in Ukrainian]

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Orlyuk, M., Drukarenko, V., Reva, M., Shabatura O. (2019). Petrophysical parameters of rocks of the Visean stage (Lokhvitsky zone of the Dnieper-Donets Basin). *Geophysical Journal*, 41, 2, 145–160. [in Ukrainian]

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2020). Electrical and acoustic parameters of lower permian carbonate rocks (western part of the Hlynsko-Solokhiv'skiy oil-and-gas region of the Dnieper-Donets basin). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2 (89), 49–58. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.07> [in Ukrainian]

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2021). Electric and elastic parameters of condensed rocks of the northern edge of the Dnieper-Donets depression. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3 (94), 37–45. DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.94.04> [in Ukrainian]

Vyzhva, S.A., Mykhailov, V.A., Onyshchuk, I.I. (2014). Petrophysical parameters of rocks from the areas of eastern sector of the Dnieper-Donets depression promising for shale gas. *Geophysical Journal*, 36, 2, 145–157. [in Ukrainian]

Vyzhva, S.A., Mykhailov, V.A., Onyshchuk, D.I., Onyshchuk, I.I. (2013). Petrophysical parameters of unconventional types of reservoir rocks from southern oil-and-gas region. *Geoinformatics*, 3 (47), 17–25. [in Ukrainian]

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, N., Shabatura, O. (2018). Reservoir features of the upper carbon sediments (Runovshchyn'ska area of the Dnieper-Donets basin). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 83, 30–37. [in Ukrainian]

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, N., Shabatura, O. (2019). Electrical parameters of the upper carbon rocks (Runovshchyn'ska area of the Dnieper-Donets basin). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 85, 37–45. [in Ukrainian]

Надійшло до редколегії 24.09.21

S. Vyzhva¹, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: vyzhva_s@ukr.net;
V. Onyshchuk¹, PhD (Geol.), Assoc. Prof.,
E-mail: vitus16@ukr.net;
M. Orlyuk^{1,2}, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: orlyuk@ukr.net;
I. Onyshchuk¹, PhD (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: oivan1@ukr.net;
M. Reva¹, PhD (Phys.-Math.), Assoc. Prof.,
E-mail: mvreva@gmail.com;
O. Shabatura¹, PhD (Geol.),
E-mail: dard@ukr.net;

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;

²Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine,
32 Palladin Ave., Kyiv, 03142, Ukraine

ELECTRIC AND ELASTIC PARAMETERS OF CARBONIC PERIOD TERRIGENOUS ROCKS OF THE EASTERN PART OF THE NORTHERN EDGE OF THE DNIEPER-DONETS DEPRESSION

The main objective of this article is studying of electrical and acoustic parameters of Carbonic period terrigenous rocks of the eastern part of the northern edge of the Dnieper-Donets depression (DDD).

It was determined that in atmospheric conditions the resistivity of dry extracted rocks (the specific electrical resistivity of framework of grains) varies from 6.522 kΩ·m to 2.782 MΩ·m (mean 1.033 MΩ·m), for sandstones – from 16.18 kΩ·m to 206.815 MΩ·m (mean 27.973 MΩ·m). The resistivity of rocks saturated with model of reservoir water (salinity $M = 180$ g/l) varies: for siltstones from 3.3 Ω·m to 26.8 Ω·m (mean 8.5 Ω·m), for sandstones from 2.9 Ω·m to 20.3 Ω·m (mean 8.2 Ω·m).

In laboratory it was defined that in atmospheric conditions formation resistivity factor varies: for siltstones from 41.2 to 277.9 Ω·m (mean 96.2 Ω·m), for sandstones from 34 Ω·m to 238.5 Ω·m (mean 94.5 Ω·m).

Physical modelling of reservoir conditions (temperature 94–126 °C, confining stress 41–55 MPa, salinity $M = 180$ g/l) showed that the specific electrical resistivity varies: for siltstones from 0.4 Ω·m to 7.7 Ω·m (mean 2.1 Ω·m), and sandstones – from 0.4 Ω·m to 3.5 Ω·m (mean 1.3 Ω·m). Due to the closure of microcracks and the deformation of the pore space, the electrical resistance of rocks increases with increase of pressure. The regression dependence of the formation resistivity enlargement factor with pressure for the studied rocks manifest itself in second order polynomial.

It was determined that in reservoir conditions the range of the formation resistivity factor varied: for siltstones from 132 to 2480 Ω·m (mean 562 Ω·m), for sandstones from 81 to 953 Ω·m (mean 339 Ω·m).

Laboratory acoustic study of velocities of the P-waves in dry extracted rocks showed that this parameter varies: for siltstones from 2616 m/s to 4706 m/s (average 3940 m/s), for sandstones from 3660 m/s to 4971 m/s (average 4245 m/s). If rocks are saturated with model of reservoir water, velocities have higher values of P-waves: for siltstones from 3596 m/s to 5438 m/s (average 4681 m/s), for sandstones from 4302 m/s to 5463 m/s (average 4942 m/s).

It was determined by physical modelling of reservoir conditions that velocities of P-waves vary: for siltstones from 3763 m/s to 6223 m/s (mean 5053 m/s), for sandstones from 4430 m/s to 5752 m/s (mean 5176 m/s). With the increase of pressure, the velocity of P-waves increases as well due to the closure of microcracks and the deformation of the pore space. The dependence of the increase in velocity from pressure is described by second order polynomial.

The comprehensive analysis of electrical and acoustic parameters of condensed rocks has been resulted in a set of correlation ratios between reservoir, electric and elastic parameters of studied samples in normal and modeling conditions.

Keywords: siltstone, sandstone, electrical resistivity, formation resistivity factor, velocities of elastic waves.

C. Выхва¹, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vsa@univ.net.ua;
В. Онищук¹, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: vitus16@ukr.net;
М. Орлюк^{1,2}, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: orlyuk@ukr.net;
И. Онищук¹, канд. геол. наук, ст. науч. сотр.,
E-mail: oivan1@ukr.net;
Н. Рева¹, канд. фіз.-мат. наук, доц.,
E-mail: mvreva@gmail.com;
А. Шабатура¹, канд. геол. наук,
E-mail: dard@ukr.net;

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
УНІ "Інститут геології", ул. Васильківська, 90, г. Київ, 03022, Україна;

²Інститут геофізики ім. С.І. Субботина НАН України,
пр. Палладина, 32, г. Київ, 03142, Україна

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И УПРУГИЕ ПАРАМЕТРЫ УПЛОТНЕННЫХ ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД КАРБОНА ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРНОЙ ПРИБОРТОВОЙ ЗОНЫ ДДВ

Посвящено изучению электрических и акустических параметров уплотненных терригенных пород карбона восточной части северной прибортовой зоны Днепровско-Донецкой впадины.

Установлено, что в атмосферных условиях значение удельного электрического сопротивления сухих экстрагированных пород (удельное электрическое сопротивление минерального скелета) изменяется: для алевролитов – от 6,522 кОм·м до 2,782 МОм·м (среднее 1,033 МОм·м), для песчаников – от 16,18 кОм·м до 206,815 МОм·м (среднее 27,973 МОм·м). Удельное электрическое сопротивление пород, насыщенных моделью пластовой воды (минерализация $M = 180$ г/л), изменяется: для алевролитов – от 3,3 Ом·м до 26,8 Ом·м (среднее 8,5 Ом·м), для песчаников – от 2,9 Ом·м до 20,3 Ом·м (среднее 8,2 Ом·м).

Лабораторными исследованиями установлено, что в атмосферных условиях вариации относительного сопротивления находится в пределах: для алевролитов – от 41,2 до 277,9 (среднее 96,2), для песчаников – от 34,0 до 238,5 (среднее 94,5).

Электрометрические исследования образцов пород в смоделированных пластовых условиях (температура $t = 94–126$ °C; эффективное давление $p_{эф} = 41–55$ МПа, минерализация воды $M = 180$ г/л) показали, что удельное электрическое сопротивление пород изменяется: для алевролитов – от 0,4 Ом·м до 7,7 Ом·м (среднее 2,1 Ом·м), для песчаников – от 0,4 Ом·м до 3,5 Ом·м (среднее 1,3 Ом·м). Вследствие закрытия микротрещин и деформации порового пространства электрическое сопротивление пород возрастает с увеличением давления. Регрессионная связь коэффициента увеличения удельного электрического сопротивления с давлением исследованных пород выражается полиномом 2 порядка.

Проведенные исследования показали, что в пластовых условиях относительное электрическое сопротивление пород изменяется: для алевролитов – от 132 до 2480 (среднее 562), для песчаников – от 81 до 953 (среднее 339).

Лабораторные акустические исследования скоростей распространения продольных волн в сухих экстрагированных породах, показали, что этот параметр изменяется: в алевролитах – от 2616 м/с до 4706 м/с (среднее 3940 м/с); в песчаниках – от 3660 м/с до 4971 м/с (среднее 4245 м/с). При насыщении пород моделью пластовой воды этот параметр изменяется: для алевролитов – от 3596 м/с до 5438 м/с (среднее 4681 м/с); для песчаников – от 4302 м/с до 5463 м/с (среднее 4942 м/с).

Физическим моделированием пластовых условий установлено, что скорость продольных волн изменяется: для алевролитов – от 3763 м/с до 6223 м/с (среднее 5053 м/с); для песчаников – от 4430 м/с до 5752 м/с (среднее 5176 м/с). С увеличением давления скорость продольных волн растет вследствие закрытия микротрещин и деформации порового пространства. Зависимость увеличения скорости от давления описывается полиномом 2 порядка.

Анализ данных лабораторных электрометрических и акустических исследований пород позволил установить корреляционные связи между фильтрационно-емкостными, электрическими и упругими параметрами исследованных уплотненных пород.

Ключевые слова: алевролиты, уплотненные песчаники, удельное электрическое сопротивление, относительное электрическое сопротивление, скорость упругих волн.