

ГЕОФІЗИКА

УДК 550.8.056

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.07>

С. Вижва, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vsa@univ.net.ua;
В. Онищук, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: vitus16@ukr.net;
І. Онищук, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,
Email: oivan1@ukr.net;
М. Рева, канд. фіз.-мат. наук, доц.,
E-mail: mvreva@gmail.com;
О. Шабатура, канд. геол. наук,
E-mail: dard@ukr.net;

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ІНІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

ЕЛЕКТРИЧНІ Й АКУСТИЧНІ ПАРАМЕТРИ НИЖНЬОПЕРМСЬКИХ КАРБОНАТНИХ ПОРІД ЗАХІДНОЇ ЧАСТИНИ ГЛИНСЬКО-СОЛОХІВСЬКОГО ГАЗОНАФТОНОСНОГО РАЙОНУ ДДЗ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. М.І. Орлюком)

Присвячено вивченню електричних й акустичних параметрів нижньопермських карбонатних порід західної частини Глинсько-Солохівського газонафтоносного району Дніпровсько-Донецької западини.

Установлено, що в атмосферних умовах значення питомого електричного опору сухих екстрагованих вапняків (питомий електричний опір мінерального скелета) змінюється від 111,953 КОм-м до 12,147 МОм-м (середнє 1,542 МОм-м). У разі насичення газом вапняки мають діапазон зміни питомого електричного опору від 44,478 КОм-м до 14,449 МОм-м (середнє значення 1,435 МОм-м). Отже, середні значення електричних опорів сухих порід і насичених газом практично не відрізняються, у зв'язку з високими опорами наповнювачів. Питомий електричний опір вапняків, насичених моделлю пластової води (мінералізація $M=190$ г/л), змінюється від 1,11 Ом-м до 23,16 Ом-м (середнє 3,12 Ом-м).

Лабораторними дослідженнями встановлено, що в атмосферних умовах варіація відносного електричного опору вапняків знаходиться в межах від 13,5 до 228,5 (середнє 32,5).

Електрометричні дослідження зразків вапняків у змодельованих пластових умовах (температура $t=50^{\circ}\text{C}$, тиск $p=30$ МПа, мінералізація насичувального розчину $M=190$ г/л) показали, що питомий електричний опір порід у цих умовах загалом змінюється від 0,81 Ом-м до 13,19 Ом-м (середнє 2,67 Ом-м). Вивчена залежність питомого опору порід від тиску. 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 лінійною функцією.

На основі досліджень відносного електричного опору і пористості порід у пластових умовах встановлено, що відносний електричний опір вапняків змінюється від 17,3 до 271,9 (середнє 50,7), а відповідні зміни коефіцієнта пористості становлять від 0,040 до 0,169 (середнє 0,118). Кореляційний зв'язок цих параметрів має лінійний вид.

Лабораторними вимірюваннями відносної діелектричної проникності вапняків визначено, що її величина для сухих зразків змінюється від 3,0 до 7,5 (середнє 4,2), а для насичених газом – від 2,8 до 8,8 (середнє значення 4,5). Отже, результати досліджень свідчать, що діелектрична проникність сухих порід і насичених газом практично не відрізняється. У разі насичення вапняків моделлю пластової води (розчином NaCl) вона стрімко зростає – від сотень до тисяч разів (у середньому в 944 рази) і її значення змінюються від 655 до 9565 (середнє 4280). Стрімке зростання даного параметра пов'язане з високою провідністю моделі пластових вод і, як наслідок, досить високою їх діелектричною проникністю.

Лабораторні акустичні дослідження швидкостей поширення поздовжніх і поперечних хвиль у породах, насичених розчином NaCl, показали, що швидкість поздовжніх хвиль варіює в межах від 3346 м/с до 4388 м/с (середнє 4030 м/с), а швидкість поперечних хвиль – від 1753 м/с до 2121 м/с (середнє 1942 м/с). У разі насичення вапняків газом швидкість поздовжніх хвиль змінюється несуттєво, порівняно зі зразками, насиченими розчином NaCl, її діапазон зміни становить від 3433 м/с до 4514 м/с (середнє 4011 м/с). Швидкість поперечних хвиль у цьому разі зростає в середньому в 1,2 рази й варіює в межах від 2137 м/с до 2464 м/с (середнє 2344 м/с).

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

Ключові слова: питомий електричний опір, відносний електричний опір, відносна діелектрична проникність, швидкість пружних хвиль, вапняки.

Постановка проблеми. У результаті виконаних останнім часом досліджень установлено, що північно-західна частина Дніпровсько-Донецької Западини (ДДЗ) є одним із найперспективніших районів на наявність нетрадиційних покладів вуглеводнів (сланцевий газ, газ ущільнених порід, сланцева нафта), які можуть у разі перевищувати ресурси традиційного типу (Михайлов та ін., 2014^{1,2}). У межах західної частини Глинсько-Солохівського газонафтоносного району ДДЗ значно поширені нижньопермські карбонатні породи, які є перспективними на вуглеводні. Зазначені породи представлені слабодоломітизованими вапняками з малопотужними прошарками піщанистих або алевропіщанистих вапняків. Характеристика петрофізичних властивостей цих порід (у т. ч. електричних параметрів) є одним із важливих засобів оцінки нафтогазового потенціалу перспективних товщ як традиційних, так і нетрадиційних колекторів, що зумовлює актуальність їх петрофізичного вивчення.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Вивченню фізичних властивостей порід газонафтоперспективних районів України присвячений ряд публікацій (Вижва та ін., 2010, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018, 2019; Vyzhva, 2017; Карпенко та ін., 2014; Маслов та ін., 2017; Михайлов та ін., 2014^{1,2}; Нестеренко, 2010; Орлюк, 2013; Орлюк, 2018; Садівник, 2013; Федоршин, 2018 та ін.). Слід відзначити, що електричні параметри порід мають важливе значення для оцінки їх колекторських властивостей за даними свердловинних електрометричних досліджень. При цьому петрофізичні характеристики порід і їх кореляційні зв'язки з фільтраційно-ємнісними параметрами мають досить виражений індивідуальний характер щодо кожної ділянки досліджень. Тому результати вивчення цих властивостей та встановлення відповідних кореляційних зв'язків у межах кожної перспективної площі потребують окремого публічного висвітлення.

Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми. Актуальність пошуків і вивчення традиційних і нетрадиційних (сланцевий газ, сланцева нафта, газ ущільнених колекторів та ін.) джерел вуглеводнів на сучасному етапі є очевидною. Для оцінки перспективності на вуглеводні геологічних структур і комплексів, окрім геолого-геофізичних та економічних параметрів, вмісту органічної речовини й ступеня її термічної переробки, важливе значення мають також петрофізичні властивості гірських порід. Вони використовуються для оцінки колекторських властивостей порід за даними свердловинних електрометричних та акустичних досліджень пошуково-розвідувальних свердловин. Слід відзначити, що петрофізичні дослідження до недавнього часу були спрямовані переважно на вивчення порід-колекторів традиційних джерел нафти й газу. Водночас петрофізичні (зокрема, електричні й акустичні) параметри порід-колекторів нетрадиційних джерел вуглеводнів на сьогодні є маловивченими або зовсім невивченими. Незважаючи на велику кількість публікацій, для ряду порід-колекторів практично відсутні дані результатів їх лабораторних електрометричних та акустичних досліджень і їхні кореляційні залежності з фільтраційно-ємнісними параметрами.

Мета досліджень. Оцінка перспективності відкладів на вуглеводні виконується через визначення електричних та акустичних властивостей окремих типів і груп порід та встановлення кореляційних зв'язків із фільтраційно-ємнісними параметрами. Матеріали про зміни питомого електричного опору й швидкості пружних хвиль порід, отримані під час лабораторних досліджень, використовуються для інтерпретації результатів електрометричних та акустичних методів досліджень свердловин, польової електророзвідки й сейсморозвідки. Метою досліджень, результати яких аналізуються у статті, є вивчення електричних та акустичних параметрів перспективних на джерела вуглеводнів нижньопермських карбонатних порід на території західної частини Глинсько-Солохівського газонафтоносного району ДДЗ.

Експериментальні дослідження. Виконаний комплекс петрофізичних досліджень у НДЛ Теоретичної та прикладної геофізики ННІ "Інститут геології" КНУ імені Тараса Шевченка включав визначення: густини порід; відкритої та ефективною пористості; структури капілярного простору; питомого електричного опору; швидкості пружних хвиль в атмосферних і пластових умовах. Виконано також петрографічні дослідження.

У даній статті наведено результати комплексних електрометричних і акустичних досліджень властивостей колекції із 79 зразків нижньопермських відкладів західної частини Глинсько-Солохівського газонафтоносного району ДДЗ (вапняків в інтервалі глибин 1765–1900 м).

Коротка петрографічна характеристика. Нижньопермські досліджувані породи належать до мікритових, спаритових, мікрито-спаритових і доломітизованих піщаних вапняків. Структура теригенного матеріалу різноманітна, окремі зерна досягають грубого псамітового розміру, а присутній у вапняках пелітоморфний кварц є невід'ємною складовою мікритових різновидів (у т. ч. і у спаритах), де він асоціює з глинистою (сметитовою) складовою. Головною ознакою вказаних порід є забарвлення окремих шарів та прошарків, яке контролюється вмістом у них сметитової складової зеленуватого кольору. Виділяються сірі, іноді злегка буруваті спарити, зеленувато-сірі мікрито-спарити, зелені мікрити та світло-сірі їх різновиди. Для шарів і прошарків характерні непаралельні, хвилясті, хмароподібні й лінзоподібні їх

межі. Зустрічаються прошарки, збагачені піщаним матеріалом із сульфідною мінералізацією.

Досліджені породи мають міжзернові, часто несполучані між собою, пори розміром 0,01–0,03 мм. Їх внутрішня поверхня й контури підпорядковані граням незрощуваних між собою ромбодів. Слабка проникність різних вапняків зумовлена наявністю павутинної системи міжзернових тріщин, дуже часто заповнених аморфною глинистою колоїдогенною речовиною, або тектонічних тріщин, частково виповнених перевідкладеним мікритом чи кірками кальциту.

Петрографічні особливості порід дозволяють зробити припущення, що формування карбонатних відкладів відбувалося в середньоглибинній частині шельфу, де осідав планктон, про що свідчать біоморфні рештки, які складають основу перекристалізованих спаритових та мікрито-спаритових різновидів. У зону формування тонкозернистих біоморфних карбонатних осадів періодично надходив теригенний несортований матеріал (можливо шторміти) або осади, перенесені придонними течіями, які привносили в більш глибоководні ділянки разом з теригенним матеріалом фрагменти слабо консолідованих (можливо водоростями) сметитових кірочок. Осади мають трансгресивний характер: знизу вгору по розрізу спостерігається зменшення потужності та кількості теригенних прошарків. В осадах наявні текстури опливання, що формувалися всередині пластів за рахунок неоднорідного літостатичного тиску на діагенетичній стадії після формування кристалів і мікроконкрецій сульфідів. Присутня доломітизація порід має вибіркового характеру: більш інтенсивна – по біоморфних рештках, мінімальна – по кальцитовому мікриту. Вірогідно, що доломітизація вапняків відбувалася на епігенетичній стадії після (або під час) формування кліважної тріщинуватості. Проте додаткова пористість не утворювалася, у зв'язку із заліковуванням пор і тріщин сметитом і пелітоморфним карбонатом.

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 двохелектродною схемою в діапазоні від 10 кОм до 10 ТОм із цифровим записом результатів вимірювань на ЕОМ за спеціальною програмою (*Вижва та ін., 2010, 2012, 2013, 2014, 2017; Vyzhva, 2017*). Для вимірювання зразків, насичених моделлю пластової води (розчин NaCl, мінералізація 170 г/л), застосовувався RCL-метр МНС-1100. Циліндричні зразки під час вимірювання розташовувались у спеціальному кернотримачі, розробленому в НДЛ Теоретичної та прикладної геофізики. За результатами контрольних вимірювань на еталонах і зразках було встановлено, що відносна похибка не перевищує 3,6 %.

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 швидкості поширення пружних хвиль у гірських породах застосовано імпульсно-фазовий ультразвуковий метод (*Продайвода, 2000, 2007*). Лабораторні акустичні дослідження виконані за допомогою установки "Керн-4", розробленої в НДЛ Теоретичної та прикладної геофізики та співробітниками механіко-математичного факультету. Вимірювання швидкості пружних хвиль здійснювалося на спеціально виготовлених лабораторних зразках, орієнтованих уздовж нашарування. Відносна похибка визначень швидкості пружних хвиль не перевищила 2 %.

З метою визначення залежності петрофізичних параметрів від водонасичення порід, а отже і їх нафтогазонасичення, досліджені зміни питомого електричного опору та 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 та 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 0,03 до 1,078 МПа (7 циклів вимірювань). Паралельно визначалися також коефіцієнти водонасичення.

Для встановлення кореляційного зв'язку між електричними параметрами порід в атмосферних і пластових

умовах виконаний відповідний комплекс лабораторних петрофізичних досліджень у змодельованих пластових умовах – при температурі $t=50^{\circ}\text{C}$, тиску $p=30\text{ МПа}$ і мінералізації насичувального розчину $M=190\text{ г/л}$.

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

Аналіз даних електрометричних досліджень. У результаті виконаних лабораторних електрометричних вимірювань визначено електричні параметри нижньопермських карбонатних відкладів західної частини Глинсько-Солохівського газонафтоносного району ДДЗ, дані про межі змін та середні значення яких наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Межі змін і середні значення електричних параметрів нижньопермських карбонатних відкладів

Породи	Значення параметра	Атмосферні умови			Пластові умови		
		Питомий електричний опір, Ом·м			відносний електричний опір, P	питомий електричний опір порід насичених розчином NaCl, Ом·м	відносний електричний опір, P _{пл}
		сухих	насичених гасом	насичених розчином NaCl			
Вапняки: мікритові, спаритові, мікритоспаритові, доломітизовані піщанисті	мін.	111953	44478	1,11	13,5	0,81	17,3
	макс.	12146665	14449461	23,16	228,5	13,90	271,9
	сер.	1542135	1434737	3,12	32,7	2,67	50,7

Лабораторними вимірюваннями в атмосферних умовах встановлено, що питомий електричний опір сухих екстрагованих зразків (питомий електричний опір мінерального скелета) змінюється від 111,953 кОм·м до 12,147 МОм·м за середнього значення 1,542 МОм·м. Вапняки, насичені гасом, мають діапазон зміни питомого електричного опору від 44,478 кОм·м до 14,449 МОм·м (середнє значення 1,435 МОм·м). Варто відмітити, що за середніми значеннями опорів, породи насичені повітрям і гасом практично не відрізняються у зв'язку з високими опорами наповнювачів.

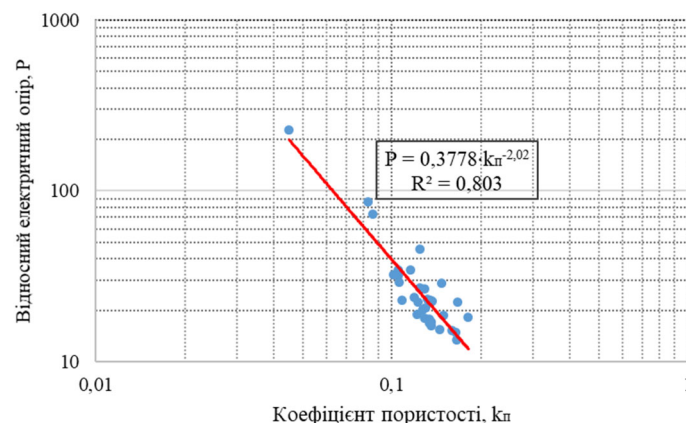
Питомий електричний опір зразків порід, насичених моделлю пластової рідини (розчин NaCl), змінюється від 1,11 Ом·м до 23,16 Ом·м за середнього значення 3,12 Ом·м.

У результаті лабораторних досліджень визначено також відносний електричний опір порід (P) – відношення питомого опору повністю насиченої породи ($\rho_{\text{пв}}$) до питомого опору насичувального розчину ($\rho_{\text{в}}$): $P = \rho_{\text{пв}} / \rho_{\text{в}}$ (Дахнов, 1975; Туаб і Доналдсон, 2009). Аналіз отриманих даних дозволив установити, що відносний електричний опір вапняків змінюється від 13,5 до 228,5 за середнього

значення 32,5. Відповідний до цього діапазон зміни коефіцієнта пористості складає від 0,045 до 0,181 за середнього значення 0,127.

За даними лабораторних вимірювань побудована кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ($k_{\text{п}}$) і відносним електричним опором (P), яка має вигляд $P = a \cdot k_{\text{п}}^{-m}$, де a – постійний коефіцієнт, m – структурний показник (рівняння Арчі–Дахнова (Дахнов, 1975; Туаб і Доналдсон, 2009)). (рис. 1). Для досліджених порід коефіцієнт $a = 0,3778$, а структурний показник $m = 2,02$ (рис. 1).

Важливою інформаційною характеристикою при петрофізичних дослідженнях гірських порід є параметр збільшення електричного опору ($P_{\text{н}}$), який являє собою відношення питомого опору частково водонасичених порід ($\rho_{\text{нв}}$) до питомого опору повністю водонасичених порід ($\rho_{\text{пв}}$): $P_{\text{н}} = \rho_{\text{нв}} / \rho_{\text{пв}}$. У процесі експериментальних лабораторних досліджень на центрифугі ОС-6М і статистичного аналізу даних електрометричних вимірювань була отримана кореляційна залежність параметра $P_{\text{н}}$ від коефіцієнта водонасичення ($k_{\text{в}}$), яка має вигляд наведеного вище рівняння Арчі–Дахнова і для досліджених порід записується у вигляді: $P_{\text{н}} = 1,1609 \cdot k_{\text{в}}^{-1,937}$ (рис. 2).

Рис. 1. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ($k_{\text{п}}$) та відносним електричним опором (P) вапняків

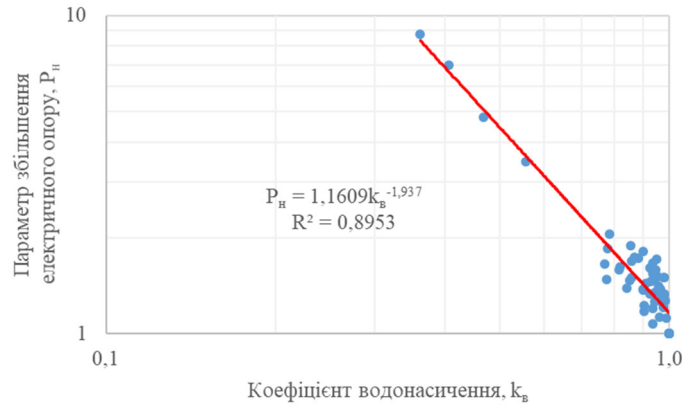


Рис. 2. Кореляційна залежність між параметром збільшення електричного опору (P_n) та коефіцієнтом водонасичення (k_b)

З метою оцінки питомого й відносного електричного опорів порід у пластових умовах виконані комплексні дослідження на спеціальній установці високого тиску ВСЦ-1000 при зміні тиску від атмосферного до 30 МПа. Вимірювання виконувались на зразках, насичених розчином NaCl. Межі змін і середні значення питомого й відносного електричного опорів порід у пластових умовах (температура $t=50^\circ\text{C}$, тиск $p=30\text{ МПа}$, мінералізація насичувального розчину $M=190\text{ г/л}$) наведені в табл. 1. За результатами фізичного моделювання встановлено, що питомий електричний опір порід у пластових умовах змінюється від 0,81 Ом·м до 13,90 Ом·м за середнього значення 2,67 Ом·м.

Вимірювання електричних параметрів порід при різних тисках показало, що їх питомий електричний опір із збільшенням тиску зростає, що пояснюється закриттям мікротріщин у породах та деформацією в них порового простору.

Виконаними дослідженнями визначено відносний електричний опір порід у пластових умовах. Аналіз отриманих даних дозволив установити, що відносний електричний опір вапняків у пластових умовах змінюється в діапазоні від 17,3 до 271,9 при середньому значенні 50,7, а відповідний діапазон зміни коефіцієнта пористості сягає від 0,040 до 0,169 при середньому значенні 0,118.

Комплексний аналіз даних лабораторних електрометричних вимірювань дозволив отримати для досліджених вапняків кореляційні зв'язки між питомими електричними опорами в атмосферних (ρ) і пластових ($\rho_{пл}$) умовах (рис. 3), між відносними електричними опорами в атмосферних (P) і пластових ($P_{пл}$) умовах (рис. 4) та між коефіцієнтом пористості ($k_{п,пл}$) й відносним електричним опором ($P_{пл}$) у пластових умовах (рис. 5). Залежності між питомими та відносними електричними опорами в атмосферних і пластових умовах для досліджених порід виражаються лінійними функціями (рис. 3, 4).

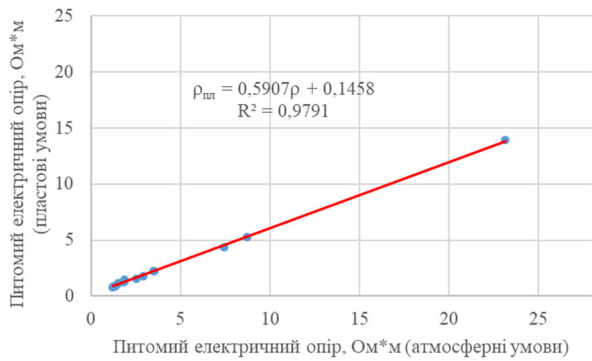


Рис. 3. Кореляційна залежність між питомим електричним опором вапняків в атмосферних (ρ) і пластових ($\rho_{пл}$) умовах

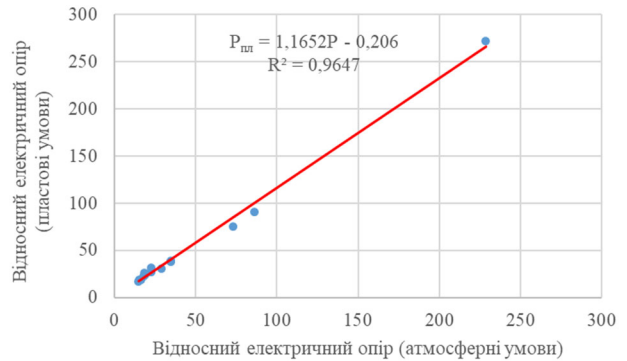


Рис. 4. Кореляційна залежність між відносним електричним опором вапняків в атмосферних (P) і пластових ($P_{пл}$) умовах

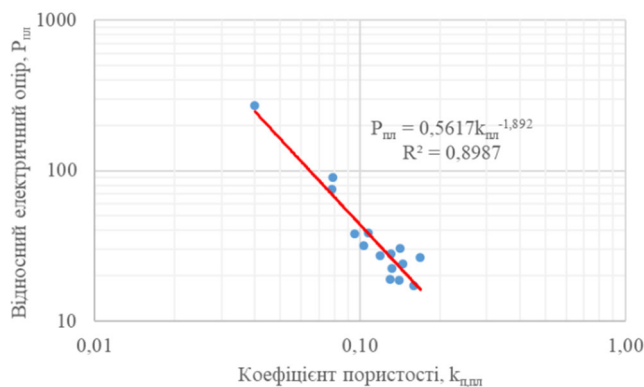


Рис. 5. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ($k_{п,пл}$) й відносним електричним опором ($P_{пл}$) вапняків (пластові умови)

Отримані кореляційні залежності, наведені на рисунках 3–5, дозволяють оцінювати відповідні параметри порід, що знаходяться в пластових умовах, за результатами лабораторного визначення цих параметрів в атмосферних умовах.

У результаті лабораторних електрометричних досліджень відносної діелектричної проникності порід (ϵ) на частоті 1000 Гц для досліджених вапняків визначені межі

зміни цього параметра. Аналіз отриманих даних свідчить, що діелектрична проникність сухих екстрагованих зразків змінюється від 3,0 до 7,5 при середньому значенні 4,2. Діелектрична проникність порід, насичених газом, варіює в межах від 2,8 до 8,8 при середньому значенні 4,5, а насичених моделлю пластової води (розчином NaCl) – у межах від 655 до 9565 при середньому значенні 4280 (табл. 2).

Таблиця 2

Породи	Значення параметра	Відносна діелектрична проникність (ϵ)		
		сухих	насичених газом	насичених розчином NaCl
Вапняки: мікритові, спаритові, мікрито-спаритові, доломітизовані піщанисті	мін.	3,0	2,8	655
	макс.	7,5	8,0	9565
	сер.	4,2	4,5	4280

Слід відзначити, що відносна діелектрична проникність сухих порід і насичених газом ($\epsilon=2$) практично не відрізняється (табл. 2). Це пояснюється відносно малою відмінністю діелектричної проникності газу від повітря, оскільки вони є діелектриками. У результаті при заповненні незначного об'єму пор породи повітрям чи газом діелектрична проникність породи в цілому буде відрізнятися не суттєво, оскільки цей параметр буде визначатися переважно діелектричною проникністю самого скелета породи. Інша картина спостерігається при насиченні порід розчином NaCl (моделлю пластової води), діелектрична проникність якого значна. У цьому разі відносна діелектрична проникність вапняків, пори яких насичені розчином NaCl, різко зростає – від сотень до тисяч разів (у середньому у 944 рази).

Аналіз даних лабораторних електрометричних досліджень дозволив отримати ряд кореляційних залежностей між відносною діелектричною проникністю досліджених порід, насичених розчином NaCl та газом, і фільтраційно-емнісними параметрами.

Залежності відносної діелектричної проникності від коефіцієнта пористості для різного характеру насичення зразків (рис. 6, 7) описуються лінійними функціями, при цьому у разі насичення вапняків розчином NaCl ця залежність пряма, а при насиченні газом – обернена. Це пояснюється тим, що при насиченні породи розчином NaCl збільшення її пористості призводить до збільшення кількості розчину в породи, діелектрична проникність якого суттєво вища за діелектричну проникність самої породи. У разі насичення породи газом збільшення пористості призводить до збільшення вмісту діелектрика в породи з меншою діелектричною проникністю порівняно із самою породою, у результаті чого спостерігається обернена кореляційна залежність $\epsilon=f(k_p)$.

У результаті аналізу отриманих даних встановлені кореляційні залежності відносної діелектричної проникності від коефіцієнта залишкового водонасичення та нафтонасичення (рис. 8, 9), а також менш тісна кореляційна залежність відносної діелектричної проникності від коефіцієнта проникності (рис. 10). Отримані залежності описуються степеневими функціями.

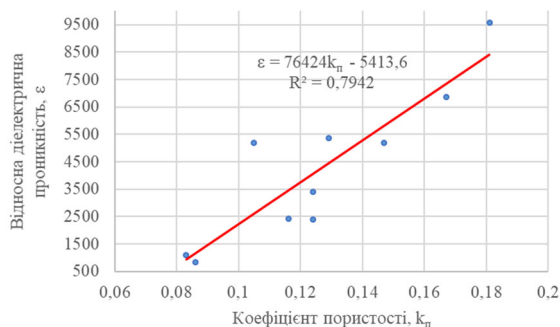


Рис. 6. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості (k_p) й відносною діелектричною проникністю (ϵ) вапняків, насичених розчином NaCl

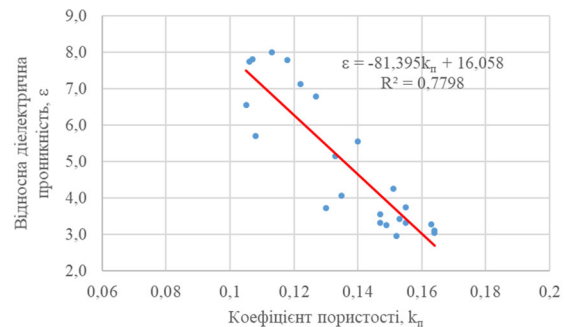


Рис. 7. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості (k_p) й відносною діелектричною проникністю (ϵ) вапняків, насичених газом



Рис. 8. Кореляційна залежність між коефіцієнтом залишкового водонасичення ($k_{зв}$) і відносною діелектричною проникністю (ϵ) вапняків, насичених розчином NaCl

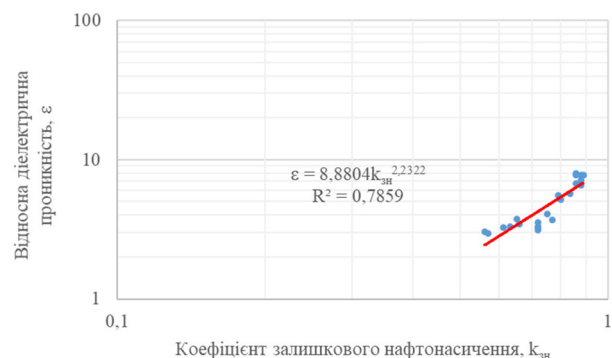


Рис. 9. Кореляційна залежність між коефіцієнтом залишкового нафтонасичення ($k_{н}$) і відносною діелектричною проникністю (ϵ) вапняків, насичених газом

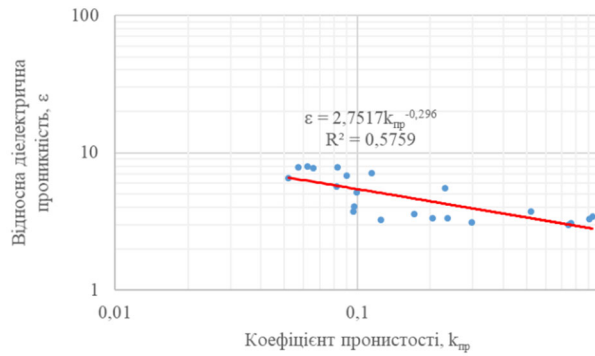


Рис. 10. Кореляційна залежність між коефіцієнтом проникності ($k_{пр}$) й відносною діелектричною проникністю (ϵ) вапняків, насичених газом

Аналіз даних акустичних досліджень. Під час лабораторних петрофізичних досліджень в атмосферних і змодельованих пластових умовах проведений комплекс акустичних вимірювань швидкостей поширення пружних хвиль у карбонатних відкладах західної частини Глинсько-Солохівського газонафтоносного району ДДЗ. В атмосферних умовах вимірювалися швидкості поширення

поздовжніх і поперечних хвиль у сухих і насичених моделлю пластової води (розчином NaCl) та газом зразках. Акустичні дослідження в пластових умовах включали вимірювання швидкостей поширення поздовжніх хвиль у насичених розчином NaCl зразках. Результати зазначених акустичних досліджень наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Межі змін і середні значення швидкостей пружних хвиль досліджених порід

Породи	Значення параметра	Атмосферні умови						Пластові умови
		Швидкість поздовжніх хвиль, м/с			Швидкість поперечних хвиль, м/с			
		сухих	насичених газом	насичених розчином NaCl	сухих	насичених газом	насичених розчином NaCl	
Вапняки: мікритові, спаритові, мікріто-спаритові, доломітизовані піщанисті	мін.	2702	3433	3346	1878	2137	1753	3830
	макс.	4857	4514	4388	2533	2464	2121	5073
	сер.	3510	4011	4030	2229	2344	1942	4428

Аналіз результатів лабораторних акустичних вимірювань швидкостей поширення пружних хвиль у породах, насичених моделлю пластової води (розчин NaCl), показав, що в атмосферних умовах швидкість поздовжніх хвиль змінюється від 3346 м/с до 4388 м/с при середньому значенні 4030 м/с, а швидкість поперечних хвиль – від 1753 м/с до 2121 м/с при середньому значенні 1942 м/с. У разі насичення вапняків газом швидкість поздовжніх хвиль варіює від 3433 м/с до 4514 м/с при середньому значенні 4011 м/с, а швидкість поперечних хвиль – від 2137 м/с до 2464 м/с при середньому значенні 2344 м/с.

У сухих зразках в атмосферних умовах швидкість поздовжніх хвиль змінюється від 2702 м/с до 4857 м/с при середньому значенні 3510 м/с, а поперечних – від 1878 м/с до 2533 м/с при середньому значенні 2229 м/с.

За результатами сейсмоакустичних досліджень в атмосферних умовах встановлено ряд кореляційних залежностей між швидкостями пружних хвиль і пористістю та

густиною досліджених порід, насичених розчином NaCl, які наводяться на рис. 11–14.

Важливою інформаційною характеристикою при петрофізичних дослідженнях гірських порід є параметр зміни швидкості поздовжніх хвиль (k_v), який являє собою відношення швидкості пружних хвиль частково водонасичених порід ($V_{р,нв}$) до швидкості пружних хвиль повністю водонасичених порід ($V_{р,пв}$): $k_v = V_{р,нв}/V_{р,пв}$. З метою встановлення кореляційного зв'язку між швидкістю поздовжніх хвиль і водонасиченням карбонатних відкладів виконана серія акустичних вимірювань швидкості поздовжніх хвиль на зразках з різним ступенем насиченості їх моделлю пластової води (розчином NaCl). Зміна водонасичення порід забезпечувалася центрифугуванням насичених розчином зразків на центрифугі ОС-6М. У результаті цих досліджень побудована кореляційна залежність (рис. 15) між коефіцієнтом водонасичення (k_n) і параметром зміни швидкості поздовжніх хвиль (k_v). Ця залежність має лінійний характер.

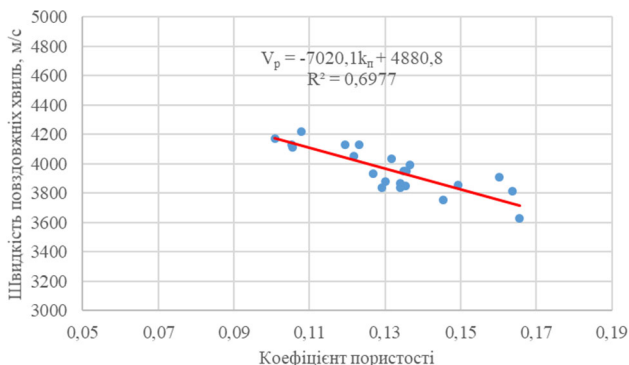


Рис. 11. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості (k_n) і швидкістю поздовжніх хвиль (V_p)

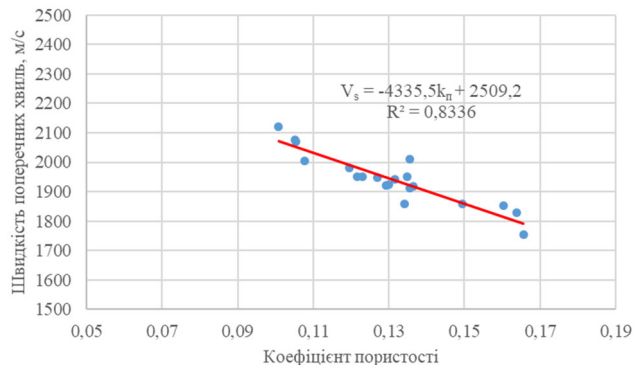


Рис. 12. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості (k_n) і швидкістю поперечних хвиль (V_s)

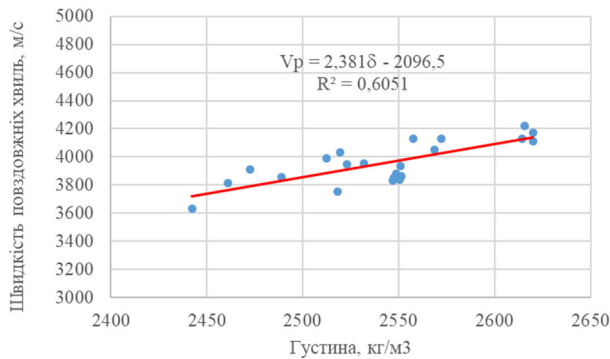


Рис. 13. Кореляційна залежність між густиною порід (δ) і швидкістю поздовжніх хвиль (V_p)

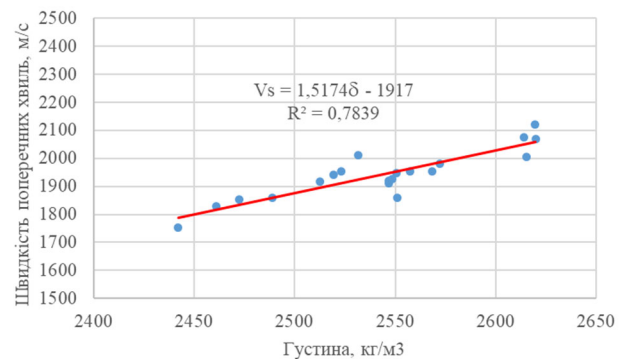


Рис. 14. Кореляційна залежність між густиною порід (δ) і швидкістю поперечних хвиль (V_s)

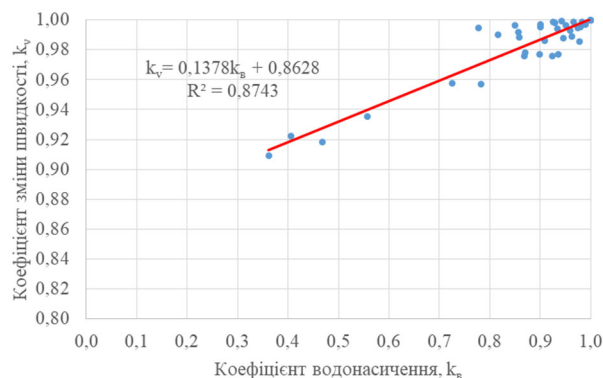


Рис. 15. Кореляційна залежність між коефіцієнтом водонасичення (K_w) і параметром зміни швидкості поздовжніх хвиль (k_v)

Акустичні дослідження швидкості поширення поздовжніх хвиль у пластових умовах $V_{p,пл}$ проведені на спеціальній установці високого тиску ВСЦ-1000 при зміні тиску від атмосферного до 30 МПа. Вимірювання виконувалися на зразках, насичених розчином NaCl. Межі змін та середні значення $V_{p,пл}$ порід у пластових умовах наведені в таблиці 3. За результатами лабораторних акустичних вимірювань під час фізичного моделювання пластових умов встановлено, що швидкість поздовжніх хвиль у карбонатних породах зростає із збільшенням тиску, внаслідок закриття в них мікротріщин та деформації

порового простору, і загалом змінюється від 3830 м/с до 5073 м/с за середнього значення 4428 м/с. Кореляційна залежність зростання швидкості поздовжніх хвиль від тиску описується поліномом 2 порядку.

Комплексний аналіз даних лабораторних акустичних досліджень дозволив отримати для досліджених вапняків кореляційні зв'язки між швидкостями поздовжніх хвиль в атмосферних і пластових умовах (рис. 16) та між коефіцієнтом пористості ($K_{n,пл}$) й швидкістю пружних хвиль ($V_{p,пл}$) у пластових умовах (рис. 17), які виражаються лінійними функціями.

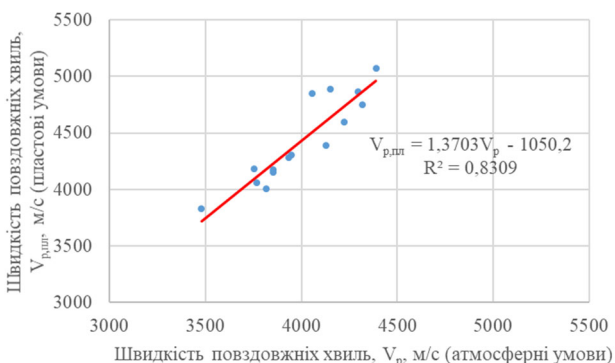


Рис. 16. Кореляційна залежність між швидкістю поздовжніх хвиль вапняків в атмосферних (V_p) і пластових ($V_{p,пл}$) умовах

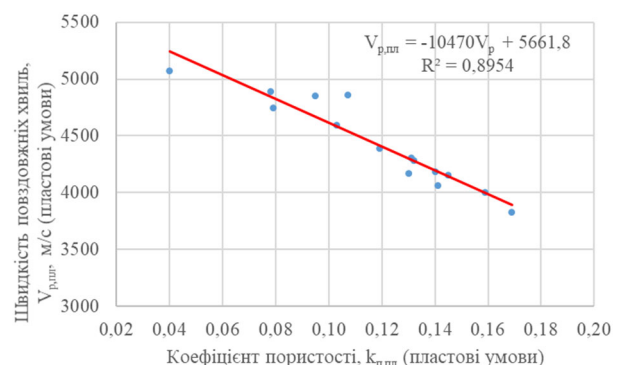


Рис. 17. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ($K_{n,пл}$) й швидкістю поздовжніх хвиль ($V_{p,пл}$) вапняків (пластові умови)

Висновки. Досліджені породи нижньопермського віку належать до мікритових, спаритових, мікрито-спаритових та доломітизованих піщанистих вапняків. Вони мають міжзернові, часто несполучувані між собою пори розміром 0,01–0,03 мм. Мала проникність цих вапняків пов'язується з наявністю павутинної системи міжзернових тріщин, часто заповнених колоїдогенною аморфною глинистою

речовиною, або тектонічних тріщин частково виповнених перевідкладеним мікритом чи кірками кальциту.

За результатами лабораторних електрометричних вимірювань в атмосферних умовах встановлено, що значення питомого електричного опору сухих екстрагованих зразків порід (питомий електричний опір мінерального скелета) змінюється від 111,953 кОм·м до 12,147 МОм·м

(середнє значення 1,542 МОм·м). При цьому спостерігаються значні варіації питомого опору зразків, що пояснюється неоднорідностями в текстурі порід (наявністю глинистих і піщаних прошарків та їх невпорядкованості). Питомий електричний опір порід, насичених моделлю пластової рідини (розчином NaCl), змінюється від 1,11 Ом·м до 23,16 Ом·м (середнє 3,12 Ом·м), а насичених гасом – від 44,478 КОм·м до 14,449 МОм·м (середнє значення 1,435 МОм·м). Варто відмітити, що за середніми значеннями опорів породи, насичені повітрям і гасом, практично не відрізняються.

Петрофізичними дослідженнями визначено відносний електричний опір порід в атмосферних умовах. Отримані дані показали, що відносний електричний опір вапняків варіює в межах від 13,5 до 228,5 (середнє 32,5) за відповідної зміни коефіцієнта пористості від 0,045 до 0,181 (середнє 0,127).

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

Фізичне моделювання пластових умов дозволило встановити, що у цих умовах питомий електричний опір вапняків змінюється в межах від 0,81 Ом·м до 13,90 Ом·м (середнє 2,67 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 від 17,3 до 271,9 (середнє 51,7). Відповідний діапазон зміни коефіцієнта пористості складає від 0,040 до 0,169 (середнє 0,118).

На основі комплексного аналізу матеріалів електрометричних досліджень для вапняків встановлені 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 знаходяться в пластових умовах.

За результатами лабораторних електрометричних вимірювань відносної діелектричної проникності в атмосферних умовах на частоті 1000 Гц встановлено, що значення діелектричної проникності сухих екстрагованих зразків вапняків (діелектрична проникність мінерального скелета) змінюється від 3,0 до 7,5 (середнє значення 4,2). Діелектрична проникність вапняків, насичених моделлю пластової рідини (розчином NaCl), варіює від 655 до 9565 (середнє 4280), а насичених гасом – від 2,8 до 8,8 (середнє значення 4,5). За діапазоном змін і середніми значеннями діелектричної проникності породи, насичені повітрям і гасом, практично не відрізняються, що пояснюється відносно малою контрастністю діелектричної проникності діелектриків, що заповнюють пори порід, якими є повітря й гас. Відносна діелектрична проникність вапняків, пори яких насичені розчином NaCl, різко зростає – від сотень до тисяч разів (у середньому в 944 рази), що пояснюється високою провідністю насичувальної рідини й отже високими значеннями її діелектричної проникності.

Комплексний аналіз даних лабораторних електрометричних досліджень дозволив отримати ряд кореляційних

залежностей між відносною діелектричною проникністю і рядом фільтраційно-ємнісних параметрів – коефіцієнтами пористості, проникності, залишкового водо- та нафтонасичення.

Лабораторними акустичними дослідженнями в атмосферних умовах встановлено, що швидкість поширення поздовжніх хвиль у вапняках, насичених моделлю пластової води, змінюється від 3346 м/с до 4388 м/с (середнє 4030 м/с), а швидкість поперечних хвиль – від 1753 м/с до 2121 м/с (середнє 1942 м/с). У вапняках, насичених гасом, швидкість поздовжніх хвиль варіює в межах від 3433 м/с до 4514 м/с (середнє 4011 м/с), а швидкість поперечних хвиль – у межах від 2137 м/с до 2464 м/с (середнє 2344 м/с). В сухих вапняках швидкість поздовжніх хвиль має діапазон зміни від 2702 м/с до 4857 м/с (середнє 3510 м/с), а поперечних – від 1878 м/с до 2533 м/с (середнє 2229 м/с).

Проведені дослідження залежності параметра зміни швидкості поздовжніх хвиль від коефіцієнта водонасичення дозволили отримати кореляційний зв'язок між ними лінійного виду.

Фізичним моделюванням пластових умов встановлено, що в цих умовах швидкість поздовжніх хвиль вапняків змінюється від 3830 м/с до 5073 м/с (середнє 4428 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 вапняків встановлені кореляційні зв'язки: між швидкостями пружних хвиль і густиною та коефіцієнтом пористості в атмосферних умовах; між коефіцієнтом водонасичення й параметром зміни швидкості поздовжніх хвиль; 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 знаходяться в пластових умовах.

Отримані за результатами петрофізичних лабораторних досліджень кореляційні зв'язки електричних й акустичних параметрів із фільтраційно-ємнісними властивостями вапняків можуть бути основою для попередньої інтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин у разі відсутності спеціалізованих петрофізичних досліджень на нових перспективних площах.

Автори висловлюють щире подяку ст. лаборанту В.С. Цуману та студентці О.О. Красніковій за їх активну й високопрофесійну участь в експериментальних дослідженнях.

Список використаних джерел

- Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онищук, Д.І., Онищук, І.І. (2013). Петрофізичні параметри нетрадиційних порід-колекторів Південного нафтогазового регіону. *Геоінформатика*, 3 (47), 1–9.
- Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онищук, Д.І., Онищук, І.І. (2014). Електричні параметри порід-колекторів імпактних структур. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 65, 31–35.
- Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онищук, Д.І., Онищук, 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., Онищук, В.І., Онищук, 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., Онищук, В.І., Онищук, І.І., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2018). Фільтраційно-ємнісні особливості порід верхнього карбону (на прикладі Руновщинської площі ДДЗ). *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 83, 30–37.

- Вишва, С.А., Онищук, В.І., Онищук, І.І., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2019). Електричні параметри порід верхнього карбону Руновщинської площі ДДЗ. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 85, 37–45.
- Вишва, С.А., Онищук, Д.І., Онищук, В.І. (2012). Петроелектрична модель порід-колекторів Західно-Шебелинського газоконденсатного родовища. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 57, 13–16.
- Вишва, С.А., Онищук, І.І. та ін. (2017). Комплексні аналітичні лабораторні дослідження кернів із свердловин Руновщинської ділянки. *Науково-технічний звіт*. Корпорація "Науковий парк Київський університет імені Тараса Шевченка".
- Вишва, С.А., Рева, М.В., Гожик, А.П., Онищук, В.І., Онищук, І.І. (2010). Петроелектричні дослідження керна складнобудованих порід-колекторів. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 50, 4–7.
- Вишва, С.А., Михайлов, В.А., Онищук, І.І. (2017). Петрофізическіе особенности пород майкопской серии Крымско-Черноморского региона. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 79, 12–20.
- Дахнов, В.Н. (1975). Геофізическіе методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения пород. М.: Недра.
- Карпенко, О.М., Михайлов, В.А., Карпенко, І.О. (2015). До прогнозу освоєння вуглеводневих ресурсів східної частини ДДЗ. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 68, 49–54.
- Маслов, Б.П., Онищук, І.І., Шинкаренко, А.В. (2017). Моделювання нелінійних в'язко-пружних властивостей терригенно-вапняковистих пісковиків. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 77, 99–105. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.77.13>.
- Михайлов В.А., Куровець І.М., Синьковський Ю.Н. та ін. (2014²). Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. Східний нафтогазоносний регіон. Кн. III. К.: "Київський університет".
- Михайлов, В.А., Вишва, С.А., Загнітко, В.М. та ін. (2014¹). Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. Східний нафтогазоносний регіон: аналітичні дослідження. Кн. IV. К.: ВПЦ "Київський університет".
- Нестеренко, М.Ю. (2010). Петрофізичні основи обґрунтування флюїдонасичення порід-колекторів. УкрДГРІ.
- Орлюк, М.І., Друкаренко, В.В. (2013). Физические параметры пород осадочного чехла северо-западной части Днепро-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: Мингео СССР.
- Продайвода, Г.Т. (2007). Математичне моделювання ефективних термомпружних властивостей багатоконпонентного тріщинуватого геологічного середовища насиченого флюїдом з внутрішнім тиском. *Геофизический журнал*, 3, 122–130.
- Рудько, Г.І., Нестеренко М.Ю. та ін. (2005). Обґрунтування кондиційних значень фільтраційно-ємнісних параметрів терригенних порід-колекторів для підрахунок запасів вуглеводнів. Методичні вказівки. Київ-Львів.
- 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).
- Тиаб, Д., Доналдсон, Э.С. (2009). Петрофізика: теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов. М.: "Премиум Инжиниринг".
- Федоришин, Д.Д., Пятковська, І.О., Трубенко, О.М., Федоришин, С.Д., Трубенко, А.О. (2018). Удосконалення методик виділення порід-колекторів складнобудованих геологічних розрізів з використанням математичної статистики. *XVII Міжнародна конференція "Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти"*, Київ, Україна, (електронна публікація).
- 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. *Геодинаміка*, 2 (25), 71–88. DOI: <https://doi.org/10.23939/jgd2018.02.071>
- Prodaivoda, G. T., Vyzhva, S. A., Khoroshun, L. P., Nazarenko, L. V. (2000). Mathematical modeling of the azimuthal anisotropy in thermoelastic properties of the oceanic upper mantle. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 36, 5, 394–405.
- Vyzhva, S.A., Onyshchuk, V.I., Onyshchuk, D.I. (2017). Electrical model of Cambrian rocks from Volodymyrska area in Volyno-Podillia (Ukraine). *Nafta-Gaz : Rok LXXIII*, 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]
- Fedorshyn, D. D., Piatkovska, I. O., Trubenko, O. N., Fedorshyn, S. D. (2018). Improved methods of allocation reservoir rock from complex constructed geological sections by using mathematical statistics. *17th International Conference on Geoinformatics "Theoretical and Applied Aspects"*, Kyiv, Ukraine. [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., Kurovets, I.M., Synkovskyy, Ju.N. et al. (2014²). Unconventional sources of hydrocarbons in Ukraine: South oil and gas region. Book III. Kyiv: Kyiv University Publishing. [in Ukrainian]
- Mykhailov, V.A., Vyzhva, S.A., Zagnitko, V.M. et al. (2014¹). Unconventional sources of hydrocarbons in Ukraine. Eastern oil-gas-bearing region: Analytical investigations. Book IV. Kyiv: Kyiv University Publishing. [in Ukrainian]
- Nesterenko, M.Yu. (2010). Petrophysical basis of the substantiating of fluid saturation of reservoir rocks. Kyiv: UkrDHR. [in Ukrainian]
- Orlyuk, M.I., Drukarenko, V.V. (2013). Physical parameters of rocks sedimentary cover of the northwestern part of the Dnieper-Donets depression. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 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. *Geodynamics*, 2 (25), 71-88. DOI: <https://doi.org/10.23939/jgd2018.02.071>
- Prodaivoda, G. T., Vyzhva, S. A., Khoroshun, L. P., Nazarenko, L. V. (2000). Mathematical modeling of the azimuthal anisotropy in thermoelastic properties of the oceanic upper mantle. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 36, 5, 394-405.
- Prodaivoda, 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: UkrDHR.
- 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"*, Kiev, Ukraine. [in Ukrainian]
- 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]
- Tiab, D., Donaldson, E.C. (2009). Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport. 2th Edition. Moscow: Premium Engineering. [in Russian]
- Vyzhva, S., Mykhailov, V., & Onyshchuk, I. (2017). Petrophysical features of maikop 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, I. et al. (2017). Complex analytical laboratory researches of core samples of Runovshchynska area wells. *Science report. Science Park Taras Shevchenko University of Kyiv*. [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, N., Shabatura O. (2018). Reservoir features of the upper carbon sediments (Runovshchynska 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 (Runovshchynska area of the Dnieper-Donets basin). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 85, 37-45. [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.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. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 36, 2, 145-157. [in Ukrainian]
- Vyzhva, S.A., Onyshchuk, V.I., Onyshchuk, D.I. (2017) Electrical model of Cambrian rocks from Volodymyrska area in Volyno-Podillia (Ukraine). *Nafta-Gaz: Rok LXXIII*, 2, 90–96. DOI: 10.18668/NG.2017.02.03
- Vyzhva, S.A., Reva, N.V., Hozhyk, A.P., Onyshchuk, V.I., & Onyshchuk, I.I. (2010). Petroelectrical investigations of borehole core of complexly-build reservoir rocks. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 50, 4-7. [in Ukrainian]

S. Vyzhva, Dr. Sci. (Geol.), Prof.
 E-mail: vyzhva_s@ukr.net;
 V. Onyshchuk, PhD (Geol.), Assoc. Prof.
 E-mail: vitus16@ukr.net;
 I. Onyshchuk, PhD (Geol.), Senior Researcher
 E-mail: oivan1@ukr.net;
 M. Reva, PhD (Phys.-Math.), Assoc. Prof.
 E-mail: mvreva@gmail.com;
 O. Shabatura, PhD (Geol.)
 E-mail: dard@ukr.net;
 Taras Shevchenko National University of Kyiv,
 Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

ELECTRICAL AND ACOUSTIC PARAMETERS OF LOWER PERMIAN CARBONATE ROCKS (WESTERN PART OF THE HLYNSKO-SOLOKHIVSKYI OF GAS-OIL-BEARING DISTRICT OF THE DNIEPER-DONETS BASIN)

The main objective of this article is to study electrical parameters of Lower Permian carbonate rocks of Western part of the Hlynsko-Solokhivskyi gas-oil-bearing district of the Dnieper-Donets Basin (DDB) in normal (atmospheric) and modeling (reservoir) conditions.

In atmospheric conditions it has been revealed that the resistivity of dry extracted limestones (the specific electrical resistivity of framework of grains was measured) varies from 12.147 k Ω -m to 111.953 M Ω -m (mean 1.542 M Ω -m). The resistivity of saturated limestone samples with kerosene varies from 44.478 k Ω -m to 14.449 M Ω -m (mean 1.435 M Ω -m). The resistivity of dry and saturated with kerosene samples is almost the same. The resistivity of limestones saturated with model of reservoir water (salinity $M = 190$ g/l) is lower and varies from 1.11 Ω -m to 23.16 Ω -m (mean 3.12 Ω -m).

It has been determined that formation resistivity factor of limestones in atmospheric conditions varies from 13.5 to 230 Ω -m (mean 32.5 Ω -m).

In addition to resistivity, the parameter of relative permittivity of investigated limestones was studied. It was determined that relative permittivity of dry limestones varies from 3.0 to 7.5 (mean 4.2). Relative permittivity saturated samples of limestones with kerosene varies from 2.8 to 8.8 (mean 4.5) and practically does not differ from dry ones but significantly lower than values of samples saturated with model of reservoir water (from 655 to 9565, mean 4280). That means when pores of limestones are saturated with NaCl solution their relative permittivity increases rapidly – from hundreds to thousands times (on average 944 times). It can be explained by the high conductivity of model of reservoir water.

Limestones saturated with NaCl solution have velocities of P-waves in the range from 3346 m/s to 4388 m/s (mean 4030 m/s), and velocities of S-waves – from 1753 m/s to 2121 m/s (average 1942 m/s). If rocks are saturated with kerosene then velocities have strictly higher values – P-waves from 3433 m/s to 4514 m/s (mean 4011 m/s) and S-waves – from 2137 m/s to 2464 m/s (average 2344 m/s).

Physical modelling of reservoir conditions (temperature 50 °C, pressure 30 MPa) showed that the specific electrical resistivity varies from 0.81 Ω -m to 13.19 Ω -m (mean 2.67 Ω -m), and limestones – from 0.49 Ω -m to 7.81 Ω -m (mean 1.95 Ω -m). Also, "specific electrical resistivity – pressure" connection was investigated. 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 has a linear character.

It was determined that in reservoir conditions the range of the formation resistivity factor for limestones varied from 17.3 to 271.9 Ω -m (mean 50.7 Ω -m), and range of variation of porosity coefficient was from 0.040 to 0.169 Ω -m (mean 0.118 Ω -m).

The comprehensive analysis of petrophysical data has been resulted in a set of correlation ratios between reservoir, electric and elastic parameters of studied limestones in normal and modeling conditions.

Keywords: specific electrical resistivity, formation resistivity factor, relative permittivity, velocities of elastic waves, correlation ratio, limestone, physical modelling of reservoir conditions.

С. Выжва, д-р геол. наук, проф.
 E-mail: vsa@univ.net.ua;
 В. Онищук, канд. геол. наук, доц.
 E-mail: vitus16@ukr.net;
 И. Онищук, канд. геол. наук, ст. науч. сотруд.
 E-mail: oivan1@ukr.net;
 Н. Рева, канд. физ.-мат. наук, доц.
 E-mail: mvreva@gmail.com;
 А. Шабатура, канд. геол. наук
 E-mail: dard@ukr.net;
 Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
 УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

ЕЛЕКТРИЧЕСКИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ НИЖНЕПЕРМСКИХ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД ГЛИНСКО-СОЛОХОВСКОГО ГАЗОНЕФТЕНОСНОГО РАЙОНА ДДЗ

Статья посвящена изучению электрических параметров нижнепермских карбонатных пород западной части Глинско-Солоховского газонефтеносного района Днепропетровско-Донецкой впадины.

В атмосферных условиях установлено, что значение удельного электрического сопротивления сухих экстрагированных известняков (удельное электрическое сопротивление минерального скелета) изменяется от 111,953 кОм-м до 12,147 МОм-м (среднее 1,542 МОм-м). При насыщении керосином известняки имеют диапазон изменения удельного электрического сопротивления от 44,478 кОм-м до 14,449 МОм-м (среднее значение 1,435 МОм-м). Электрическое сопротивление сухих пород и насыщенных керосином практически не отличается. Удельное электрическое сопротивление известняков, насыщенных моделью пластовой воды (минерализация $M=190$ г/л), изменяется от 1,11 Ом-м до 23,16 Ом-м (среднее 3,12 Ом-м).

Лабораторными исследованиями установлено, что в атмосферных условиях относительное электрическое сопротивление известняков изменяется от 13,5 до 228,5 (среднее 32,5).

Выполненное физическое моделирование пластовых условий (температура $t=50$ °C; давление $p=30$ МПа) показало, что удельное электрическое сопротивление пород в целом изменяется от 0,81 Ом-м до 13,19 Ом-м (среднее 2,67 Ом-м). Исследована зависимость удельного сопротивления пород от давления. Вследствие закрытия микротрещин и деформации порового пространства электрическое сопротивление пород растет с увеличением давления. Регрессионная связь коэффициента увеличения удельного электрического сопротивления с давлением для исследованных пород выражается линейной функцией.

В результате исследований определены относительное электрическое сопротивление и пористость пород в пластовых условиях. Установлено, что в пластовых условиях относительное электрическое сопротивление известняков изменяется от 17,3 до 271,9 (среднее 50,7), а соответствующий этому диапазон изменения коэффициента пористости составляет от 0,040 до 0,169 (среднее 0,118).

Кроме электрического сопротивления изучен параметр относительной диэлектрической проницаемости исследованных известняков. Определено, что значение относительной диэлектрической проницаемости сухих известняков изменяется от 3,0 до 7,5 (среднее 4,2). При насыщении керосином известняки имеют диапазон изменения относительной диэлектрической проницаемости от 2,8 до 8,8 (среднее значение 4,5). Диэлектрическая проницаемость сухих пород и насыщенных керосином практически не отличается. Относительная диэлектрическая проницаемость известняков, насыщенных моделью пластовой воды изменяется от 655 до 9565 (среднее 4280). Диэлектрическая проницаемость известняков, поры которых насыщены раствором NaCl, резко возрастает – от сотен до тысяч раз (в среднем в 944 раза), что объясняется высокой проводимостью модели пластовых вод.

Скорость продольных волн в породах, насыщенных раствором NaCl изменяется от 3346 м/с до 4388 м/с (среднее 4030 м/с), а скорость поперечных волн – от 1753 м/с до 2121 м/с (среднее 1942 м/с). При насыщении известняков керосином скорость продольных волн изменяется от 3433 м/с до 4514 м/с (среднее 4011 м/с), а скорость поперечных волн – от 2137 м/с до 2464 м/с (среднее 2344 м/с).

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

Ключевые слова: удельное электрическое сопротивление, относительное электрическое сопротивление, относительная диэлектрическая проницаемость, скорость упругих волн, известняки.