

РОЗРОБКА РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 550.552.53.553

І.М. Безродна, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.

Київський національний університет ім. Т. Шевченка,
м.Київ, Україна, e-mail: bezin3@ukr.net

ОЦІНКА СТРУКТУРИ ПУСТОТНОГО ПРОСТОРУ КАРБОНАТНИХ ПОРІД ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ АКУСТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В УМОВАХ ЗМІННОГО ТИСКУ

I.M. Bezrodna, Cand. Sci. (Geol.), Senior Scientist

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine,
e-mail: bezin3@ukr.net

EVALUATION OF PORE SPACE STRUCTURES OF CARBONATE ROCKS BY RESULTS OF ACOUSTIC RESEARCH UNDER VARIABLE PRESSURE

Мета. Вивчення закономірностей зміни типів пористості девонських карбонатних порід трьох площ Волино-Поділля на основі результатів вимірювання їх швидкостей пружних хвиль та відкритої пористості в умовах змінного тиску.

Методика. Для експериментальних петрофізичних досліджень (визначення швидкості повздовжніх хвиль та відкритої пористості) використовувалась оригінальна установка ультрависоких тисків. Процес лабораторного дослідження проходив при збільшенні тиску від 1 до 60 МПа та зворотню при його зменшенні до 1 МПа. Інтерпретація лабораторних досліджень проводилася за допомогою оригінальної методики, що дає можливість інвертувати дані швидкостей у модель структури пустотного простору (визначити формати пустот та їх концентрацію).

Результати. Досліджено закономірності зміни швидкостей повздовжніх хвиль при всебічному стисканні зразків. Визначено, що види кривих $V_p = f(P)$ змінюються для структурно й літологічно відмінних різновидів карбонатних порід. На основі інтерпретації лабораторних даних розраховане значення форматів пустот та їх концентрацій для кожного окремого зразка на різних стадіях стискування, визначена їх структура пустотного простору. На основі визначення спектрів пустот різних форматів та їх концентрацій за даними акустичних досліджень проведена кількісна оцінка вкладу пористості різних типів (гранулярної, тріщинної, кавернозної та вторинної) у загальну пористість. Визначені кількісні закономірності зміни типів та концентрацій пустот в умовах змінного тиску. Перспективність порід-колекторів може при стискуванні значно погіршуватися та зовсім втрачатися.

Наукова новизна. Полягає у використанні сучасної інтерпретаційної методики інверсії акустичних даних у модель структури пустотного простору для вивчення геологічної будови карбонатних порід на основі результатів їх досліджень в умовах змінних тисків.

Практична значимість. Визначення структури пустотного простору та типів пористості карбонатних порід для умов різних тисків дає можливість виділення складнопобудованих порід-колекторів на великих глибинах та прогнозувати їх перспективність.

Ключові слова: швидкості повздовжніх хвиль, умови змінного тиску, карбонатні породи, структура пустотного простору

Стан проблеми. Вплив високого тиску на пружні властивості гірських порід вивчається дослідниками з метою прогнозування їх складу та властивостей на відповідних глибинах, визначення характеру зміни швидкостей пружних хвиль під дією тиску в залежності від мінерального складу, структури, пористості, насичення, ступеня перетворення тощо.

Термобаричні петрофізичні дослідження, проведені різними авторами (Баюк О.І., Волярович М.П., Глазнев В.М., Лебедев Т.С., Коболев В.П., Корчин В.А.,

Flue E.R., Kern H., Walter C., Flemings P., Ruarri J., Schleicher A., Schneider J., Vernik L. та інші), свідчать про те, що вплив таких умов на фізичні властивості порід може бути досить значним і неоднорідним. Для оцінки достовірних значень швидкості порід на досліджуваних глибинах розраховують ізобаричні поправки, що ґрунтуються на апроксимаційних формулах.

Загалом, зі зростанням тиску здатність стискання пустот зменшується, тобто збільшується пружність породи, що призводить до зростання швидкості пружних хвиль. Чим вища пористість порід, тим більша

зміна пружності породи, що пов'язано зі зменшенням здатності пустот до стискання при збільшенні тиску.

Встановлено дослідниками Дортман Н.Б. та інш., що, при впливі зовнішнього тиску до 150 МПа на зразок, швидкість поздовжніх хвиль, при збільшенні тиску, зростає, причому основна її зміна спостерігається в діапазоні зміни тиску від атмосферного до 50 МПа. При подальшому зростанні тиску градієнт збільшення швидкості поздовжніх хвиль зменшується, і графік швидкості часто прямує до асимптоти. Але вплив тиску на швидкість хвиль для порід з різною структурою пустотного простору та мінералогічним складом також є різним. Різке зростання швидкості хвиль у гірських породах за невеликих тисків обумовлюється ліквідацією мікротріщинних дефектів. Відносна зміна швидкості хвиль, що обумовлена збільшенням тиску від атмосферного до 150 МПа, для осадових порід збільшується зі збільшенням пористості, причому вона пропорційна її величині.

При дослідженні порід Українського щита та Антарктичного півострова [1, 2] авторами констатується, що найбільший градієнт зміни швидкостей пружних хвиль для всіх типів досліджених порід спостерігається в початковому інтервалі тиску від атмосферного до 10 МПа, подальше підвищення тиску веде до збільшення швидкостей пружних хвиль, але з градієнтом, меншим у 2–3 рази. При цьому дослідниками при програмному моделюванні термобаричних умов на глибинах 7–15 км виявлені зони низьких швидкостей хвиль, що, як вважають автори [2], є результатом зворотного термодинамічного розуцілення мінеральних речовин.

При дослідженнях карбонатів Баюк Є.І., Воларович М.П., Левітова Ф.М. наводять, що структура кальциту, як основної складової таких порід, має великий вплив на змінення їх акустичних параметрів. Зокрема, шари плоских груп CO_3 обумовлюють збільшення швидкості хвиль у напрямку їх протяжності та зменшення її впоперек таких шарів. Це також впливає на зміни швидкостей хвиль при стисканні зразків, як і їх мікротріщинуватість.

Деякі автори спостерігали при всебічному стискуванні карбонатів після закономірного підвищення швидкостей хвиль їх монотонне зниження при тиску більше за 500 МПа, що пов'язують з поліморфними перетвореннями в них.

Проводяться дослідження швидкостей не тільки поздовжніх, але й поперечних хвиль в умовах змінного тиску та встановлено [3], що підвищення тиску неоднаково впливає на зміну швидкостей поздовжніх і поперечних хвиль, оскільки наявність флюїду перешкоджає повному закриттю пустот і мікротріщин.

При аналізі пружних швидкостей хвиль на зразках у формі куба або сфери оцінюється пружна анізотропія в умовах тиску [4, 5]. На основі таких досліджень авторами стверджується, що в гірських породах можуть існувати локальні залишкові напруги, лінійно або нелінійно мінливі при змінненні зовнішнього тиску, що призводить до зміни величин швидкостей хвиль і, відповідно, пружних модулів. Підкреслюється,

що отримані експериментальним шляхом швидкості хвиль досить добре порівнюються з подібними даними, що визначені за результатами вертикального сейсмічного профілювання.

Практично не досліджувалися в умовах тиску проблеми кількісної оцінки типів пористості осадових порід. Підкреслюється [6], що зі збільшенням (до 10 МПа) ефективних напруг, які впливали на гірські породи, зменшується їх гранулярна пористість, а пік кількісного розподілення розмірів пустот у досліджених зразках зміщується в сторону менших за розміром пор.

Таким чином, виявити вплив якогось одного фактора в реальних умовах для гірських порід неможливо. Подібні дослідження окремих літологічних груп порід дають можливість вирішити задачу більш глибоко та кількісно оцінити зміну типів пористості в породах під дією тиску.

Методика досліджень. Петрофізичні лабораторні дослідження проводилися на геологічному факультеті Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. Вивчалися швидкості розповсюдження поздовжніх хвиль та коефіцієнт відкритої пористості в умовах змінного тиску, а також об'ємна густина та швидкості поздовжніх і поперечних хвиль в атмосферних умовах.

Для експериментальних петрофізичних досліджень використовувалась установка ультрависоких тисків, що була сконструйована [7] співробітниками Київського національного університету ім. Тараса Шевченка.

Методика дослідження швидкостей пружних хвиль полягає в наступному. Зразок, насичений моделлю пластової води, поміщається до камери установки, де затискається між двома ультразвуковими датчиками. Через визначений інтервал часу в установці змінюють тиск та вимірюють швидкість пружної хвилі [7].

Процес лабораторного дослідження складається з двох етапів. Під час першого етапу тиск збільшується від 1 до 60 МПа із кроком 5 МПа, а під час другого – зменшується від 60 до 1 МПа.

Інтерпретаційний блок методики досліджень дає можливість кількісно оцінити структуру пустотного простору та прогнозувати колекторські властивості порід. На основі використання бази даних акустичних і ємнісних (в умовах змінних тисків), а також акустичних і густинних досліджень зразків (в атмосферних умовах), після їх стандартної статистичної обробки формуються вибірки груп зразків з близькими (за якісним наближенням) типами пористості.

Враховуючи результати досліджень автора, будова породи математично представляється у вигляді жорсткої матриці, яка армована спектром пустот, що апроксимуються сфероїдами обертання з різними форматами $\alpha = \frac{a}{c}$, де a та c – коротка та довга напівосі сфероїда.

На основі літературних даних та досліджень, які проведені безпосередньо автором, встановлено, що всі пустоти в гірських породах можна описати сфероїдами зі значеннями α від 10^{-4} до 10^3 . При цьому ізомет-

ричним і сфероїдальним порам відповідають пустоти з форматом 10^0-10^{-1} , перехідним пустотам – $10^{-1}-10^{-2}$, мікротріщинам – $10^{-2}-10^{-4}$, кавернам – 10^0-10^3 [7].

Математична модель структури пустотного простору може бути задана на основі вивчення керну під електронним або поляризаційним мікроскопом, за літературними даними чи за результатами математичного моделювання різних літотипів порід за допомогою розробленої методики [7].

Для кількісної оцінки структури пустотного простору при використанні даної методики застосовуються наступні дані:

- результати дослідження швидкостей повздовжніх хвиль зразків керну в умовах змінного тиску;
- коефіцієнт пористості, що отриманий при лабораторних дослідженнях в умовах змінного тиску;
- результати визначення густини зразків гірських порід, що отримані в атмосферних умовах;
- значення густини мінерального скелету породи, що визначаються на основі побудови функціональної залежності густина/пористість ($\sigma = f(K_n)$);
- значення швидкостей розповсюдження повздовжньої та поперечної пружних хвиль мінерального скелету порід, отримані на основі побудови залежностей швидкостей пружних хвиль від загальної пористості ($V_p = f(K_n)$, $V_s = f(K_n)$).

Вибір початкового наближення структури пустотного простору є пошуком глобальних екстремумів функції складного типу при закріплених форматах α_n і проводиться методом перебору значень концентрації заданих форматів $C_n(\alpha_n)$ із кроком Δ_n , обчислених для кожного формату. Вибір початкового наближення структури пустотного простору забезпечує експресне знаходження точки з мінімальним значенням рівня методу найменших квадратів при перетині області пошукових параметрів по вектору при фіксованих значеннях параметрів пустот α . Знайдене початкове наближення використовується при інверсії акустичних даних.

Обернена задача вирішується шляхом побудови такої теоретичної моделі розповсюдження пружних коливань у геологічному середовищі, що не суперечить спостережним даним лабораторних акустичних досліджень. При вирішенні оберненої задачі використовуються обмеження на значення концентрацій пустот різних форматів $C(\alpha_n)$

$$\sum_{n=1}^N C(\alpha_n) \leq K_n.$$

Крім того накладається умова, що концентрація пустот із певним форматом не може бути більше значення, яке забезпечує збіг експериментальних величин швидкостей пружних хвиль із теоретично розрахованими при наявності пустот тільки одного формату.

При виборі методів оптимізації доводиться враховувати два основних аспекти: отримання математично стійкого й геологічно достовірного розв'язку та швидкість сходження ітераційного процесу.

За даними інверсії знаходять значення форматів пустот та їх концентрацій для кожного окремого зразка та розраховують їх структуру пустотного простору. На основі визначення спектрів пустот різних форматів та їх концентрацій за даними акустичних досліджень проводиться кількісна оцінка вкладу різних типів пористості зразків: гранулярної, тріщинної, кавернозної та вторинної [7].

Результати досліджень. У роботі проводився аналіз результатів дослідження фізичних параметрів карбонатних зразків порід (девон) для трьох площ Волино-Поділля. З колекції зразків відібрано для ілюстрації різні типи за складом та пористістю карбонатні породи (табл. 1).

Вапняки, зазвичай, одноманітні за мінеральним складом, але, у даному випадку, наявність домішок, тип органіки, степінь доломітизації, структурна неоднорідність, широкий діапазон пористості, а також різні її типи сприяють розширенню поля зміни швидкості повздовжніх хвиль.

При аналізі враховувалося, що при дослідженнях акустичних властивостей при вивченні карбонатних порід важливе значення має мінеральний склад та структура цементу порід, оскільки ці фактори визначають їх поведінку у процесі деформації.

Коефіцієнти відкритої пористості зразків, що виміряні в атмосферних умовах, коливаються в межах 1,3–5,3%. Під час дослідження вивчалися зміни швидкості поздовжніх хвиль насичених карбонатних зразків від зміни тиску. У результаті аналізу цих даних для окремих зразків порід побудовані графіки залежності швидкості повздовжніх хвиль від зміни тиску (при його підвищенні та наступному зменшенні).

За допомогою графічного аналізу функцій $V_p = f(P)$, результатів макро- та мікропетрографічних досліджень керну та шліфів, а також результатів визначення петрофізичних властивостей зразків автором виявлені деякі закономірності.

Швидкість повздовжньої хвилі в породах, у цілому, висока. В атмосферних умовах найменші значення (4874 м/с) характерні для доломітизованого тріщинуватого вапняку *Вм 14* з пористістю 2,2% та доломітизованого вапняку з різноорієнтованою тріщинуватістю з пористістю 5,3%. Найбільші значення швидкості хвиль в атмосферних умовах отримані для низькопористих доломітизованого вапняку *Вл 15* з пористістю 1,3% (5580 м/с) та криноїдного вапняку *Бу 3* з пористістю 1,5% (5535 м/с).

При аналізі акустичних, густинних та емнісних параметрів досліджуваних порід усі зразки, крім *Вм 14*, можна віднести до однієї групи, де фізичні властивості пов'язані між собою функціонально доволі щільно. Наприклад,

$$V_p = -149,7K_n + 5801,5, (R^2 = 0,96),$$

де V_p – швидкість повздовжньої хвилі; K_n – відкрита пористість, або

$$I = -362970 K_n + 2E+07, (R^2 = 0,81),$$

де I – акустичний інваріант $та I = V_p \cdot \sigma$; σ – густина зразків.

Причини того, що різнотипні карбонатні породи з різною структурою чомусь за фізичними ознаками відносяться до однієї групи, а зразок *ВМ14* того ж класу не відноситься до цієї групи, можна дізнатися тільки при більш глибоких дослідженнях.

Для вирішення проблеми, що виникла, проведено дослідження зразків в умовах змінного тиску та розрахований вклад кожного типу пористості в загальну пористість при різному стискуванні (рис. 1–2).

У цілому, швидкість повздовжньої хвилі при збільшенні тиску збільшується з більшим або меншим градієнтом, але за результатами цих досліджень проявилися пружні відмінності в кожному з досліджених зразків (рис. 1).

Мінімальний градієнт швидкості повздовжніх хвиль зі збільшенням тиску до 60 МПа спостерігається у дрібно-тонкозернистого органогенно-детритового вапняку *Бу 7* (300 м/с) з невеличкими відхилення-

ми значень швидкості при прямому та зворотному ході вимірювань (максимально 95 м/с), без стрибкоподібних змінень швидкості, що говорить про неруйнівні зміни в породі, про неперетвореність її мінерального та тріщинно-порового складу.

Найбільший градієнт зміни швидкості (1120 м/с) при зміні тиску спостерігався у зразку *ВМ35* (доломітований тріщинуватий вапняк зі сланцюватою текстурою).

Різке збільшення швидкості повздовжніх хвиль у зразках в умовах стискування обумовлюється декількома системами тріщин у зразку ($K_n = 5,3\%$) та його структурою (нерівномірнзерниста, дрібно- та тонкозерниста).

У деяких зразках спостерігається стрибкоподібне (*Бу 3*, *Вл 15*) та нерівномірне (*Вм 14*, *Бу 7*) змінення швидкості повздовжніх хвиль при підвищенні тиску. Такі зміни говорять про складний характер пористості та, можливо, про зміну її типів на різних стадіях стискування зразків.

Таблиця 1

Геолого-петрофізична характеристика досліджених зразків

№ зразка	Інтервал відбору, м	Петрографічна характеристика порід	Коефіцієнт пористості, %	Швидкість повздовжніх хвиль зразків, м/с	Густина зразків, кг/м ³
Володимирівська площа					
ВЛ 15	1820–1824	Вапняк доломітований. Текстура: плямиста, тріщинувата, брекчієва. Спостерігається плямиста перекристалізація уламків мікритового органогенно-детритового вапняку з утворенням у них ділянок кристалічно-зернистої будови. Між уламками – пелітоморфна карбонатно-глиниста маса з вуглистою або оксидно-марганцевою тонкорозпиленою речовиною. Тріщини заповнені кальцитом. Склад: доломіт, кальцит, органогенний детрит	1,3	5819	2691
Великомостівська площа					
Вм 6	2237–2250	Вапняк доломітований. Текстура невпорядкована. Структура нерівнозерниста, тонкозерниста	3,4	4410	2755
Вм 14	2270–2286	Вапняк доломітований. Текстура слабо сланцювата. У породі спостерігаються тонкі різноорієнтовані тріщини, що виповнюються глинисто-карбонатною речовиною. Існують окремі тріщини поперечні до осі керну, по яких порода сколюється за сланцюватістю	2,2	5455	2768
Вм 35	2170–2178	Вапняк доломітований. Текстура сланцювата. По сланцюватості, що перпендикулярна до вісі керну, відмічається тріщинуватість, яка виповнюється окисними плівками. Присутня ще одна система тріщин паралельна вісі керну. Структура нерівнозерниста, дрібно- та тонкозерниста	5,3	5123	2739
Бучацька площа					
Бу 3	1158	Вапняк тонко-дрібнозернистий криноїдний. Текстура плямиста, невпорядкована. Структура нерівнозерниста, середньо-тонкодрібнозерниста, органогенно-детритова. Склад кальцитовий. Органогенні рештки представлені члениками морських лілій	1,50	5411	2686
Бу 7	1598	Вапняк дрібно-тонкозернистий органогенно-детритовий. Текстура невпорядкована. Відмічається тріщинуватість паралельна вісі керну. Структура нерівнозерниста, дрібно- та тонкозерниста. Порода складається з кальциту, можливо присутній доломіт. Органогенні рештки представлені детритом двостулков та брахіопод	4,00	5169	2664

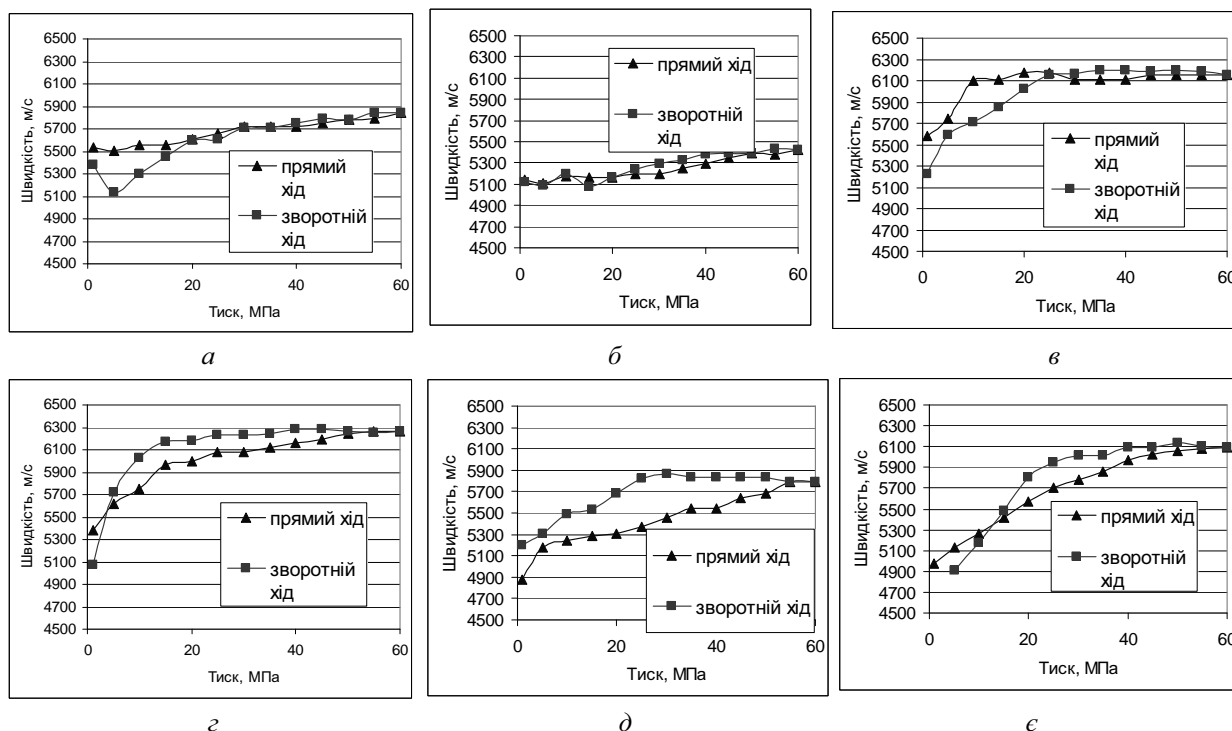


Рис. 1. Аналіз зміни швидкостей повздовжніх хвиль у залежності від прикладеного тиску для зразків: а – Бу 3; б – Бу 7; в – Вл 15; г – Вм 6; д – Вм 14; е – Вм 35

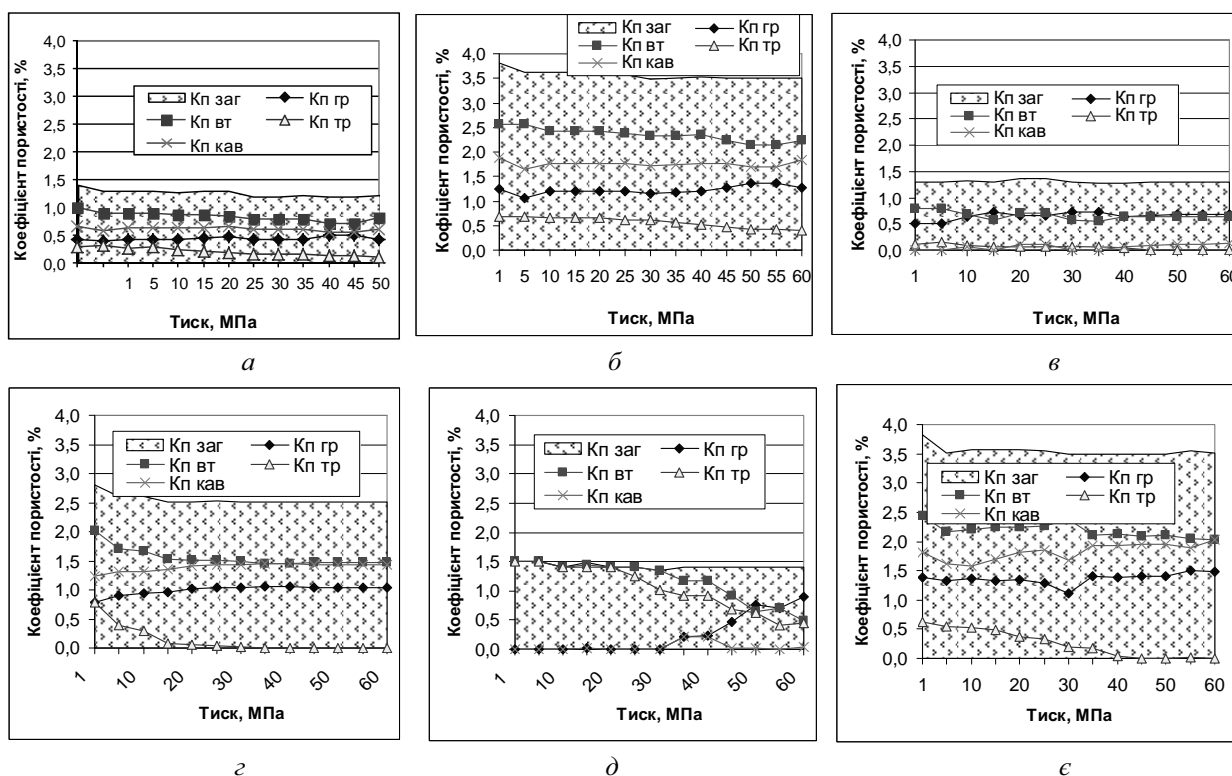


Рис. 2. Аналіз зміни типів пористості у зразках у залежності від прикладеного тиску: а – Бу 3; б – Бу 7; в – Вл 15; г – Вм 6; д – Вм 14; е – Вм 35

Характер пористості, кількісну оцінку її типів отримано за даними інверсії швидкостей повздовжніх хвиль при використанні математичної моделі карбонатного колектора, початкове наближення якої розраховане за статистичною обробкою результатів

петрофізичних досліджень колекції карбонатних зразків. Зокрема, швидкість повздовжньої хвилі у скелеті – 5780 м/с, швидкість поперечної хвилі у скелеті – 3400 м/с, густина скелету – 2790 кг/м³. В якості початкового наближення структури пустотного простору

були задані формати пористості, що характерні для карбонатних низькопористих порід [7], а саме: 0,9 (для міжзернової пористості), 0,001 (для тріщин), 4 (для каверн) та 0,05 (для перехідної пористості, що характерна для вторинно змінених тріщинуватих порід).

У результаті розрахунків отриманий набір форматів пористості для вибірок порід ($0,9 \div 0,87$; $0,05 \div 0,047$; $0,0015 \div 0,0006$; $4 \div 4,2$) та для кожного зразка концентрації пористості кожного типу на різних стадіях стискування.

Результати кількісної оцінки структури пустотного простору представлено (рис. 2) як вклад різних типів пористості до загальної пористості зразків, зокрема, тріщинної ($K_{n\ tr}$), кавернозної ($K_{n\ kav}$), вторинної ($K_{n\ 2} = K_{n\ tr} + K_{n\ пер} + K_{n\ kav}$).

Гранулярна пористість практично не змінюється в залежності від тиску (градієнт: $0,01 \div 0,17\%$), виключенням є зразок *ВМ 14*, в якому, на фоні сильного зменшення всіх інших типів пористості (тріщинної, кавернозної, перехідної), значення гранулярної пористості збільшується (на $0,91\%$).

При кількісній оцінці типів пористості в цілому, для колекції зразків переважає вторинна пористість. В атмосферних умовах у зразках *Бу 7*, *Вм 6*, *Вм 14* та *Вм 35* отримане значення $K_{n\ 2}$, що відповідає характеристиці перспективного колектора ($2,5$; $2,48$; $1,2$; $2,45\%$ відповідно). Вторинна пористість у всіх зразках зменшується (градієнт: від $0,18$ до $1,1\%$) зі збільшенням тиску незалежно від їх загальної пористості.

Кавернозна пористість у карбонатних породах підвищує їх корисну ємність і є важливим елементом при оцінці перспективності порід-колекторів. Вона, у залежності від тиску, практично не змінюється, але, на відміну від гранулярної, прослідковується невелике збільшення $K_{n\ kav}$ (градієнт: $0,04 \div 0,2\%$), що, мабуть, пов'язане з поліморфними перетвореннями в карбонатах.

Найбільш інформативною для визначення перспективності колектора є тріщинна пористість. При кількісній оцінці тріщинної пористості в атмосферних умовах у зразках *Бу 7*, *Вм 6*, *Вм 14* та *Вм 35* отримане значення $K_{n\ tr}$, що більше за граничне для порід-колекторів ($0,61 \div 1,5\%$). Для всіх зразків $K_{n\ tr}$ при стискуванні зменшується (на $0,1 \div 1,06\%$) або поступово (для зразків *Бу 3*, *Бу 7*, *Вл 15*), або стрімко (для зразків *Вм 6*, *Вм 14*, *Вм 35*). Це говорить про різний характер зміни тріщинної пористості для одновікових порід на близьких глибинах для двох груп порід. Зразки Великомоствівської площі практично звільнюються від тріщинної пористості при тиску більше за 30 МПа, що відповідає глибинам більше 2000 м, а зразок Бучацької площі (*Бу 7*) практично залишається достатньо тріщинуватим, що говорить про його можливі конформаційні фільтраційні властивості.

Висновки та перспективи розвитку напрямку. У даній роботі показані можливості використання оригінальної методики проведення та аналізу петрофізичних даних для кількісної оцінки структури пустотного простору порід та, відповідно, визначення перспективності породи-колектора.

Проведений комплексний аналіз результатів досліджень акустичних властивостей в умовах змінних тисків надав можливість визначити особливості структури пустотного простору порід, зокрема, кількісно оцінити вклад тріщинної та кавернозної пористості до загальної на різних стадіях стискування.

Визначено, що перспективність порід-колекторів може при стискуванні значно погіршуватись та зовсім втрачатися. Для визначення перспективності порід окремих літологічних груп та вікових категорій такі дослідження на великих колекціях зразків різного складу та типів пустотного простору дадуть впевнені результати.

Однак, відомо, що швидкість пружних хвиль у мінералах і породах за високих тисків найкраще вимірювати згідно з їх кристалографічною структурою в особливих напрямках, якими є вісі симетрії або перпендикуляри до площин симетрії. Тому дослідження зразків в одному напрямку дають неповну акустичну характеристику в умовах змінного тиску.

Як перспективи розвитку методики планується провести дослідницькі роботи з урахуванням анізотропії, що можливо при аналогічних вимірюваннях на зразках куборомбододекаєдрів. Це додатково дасть можливість визначити як акустичну, так і пружну анізотропію на основі розрахунку повної матриці пружних постійних.

Результати таких досліджень можуть бути використані для визначення перспективності порід різного літологічного складу та складності пустотного простору при вивченні їх нафтогазоносності.

Список літератури / References

1. Регіональні діагностичні петрофізичні особливості порід антарктичного півострова (район станції Академік Вернадський) / [В.О. Корчин, П.О. Буртний, О.Є. Карнаухова та ін.] // Український антарктичний журнал. – 2010. – № 9. – С. 23–31
Korchyn, V.O., Burtnyi, P.O., and Karnaukhova, O.Ye. (2010), "Regional diagnostic petrophysical features of rock at Antarctic Peninsula (near Vernadsky Station)", *Ukrainian Antarctic Journal*, no 9, pp. 23–31.
2. Петрофізические исследования горных пород при высоких РТ-параметрах и глубинное вещественное моделирование литосферы / [В.П. Кобольев, В.А. Корчин, П.А. Буртний и др.] // Вестник ОНЗ РАН. – 2010. – № 2. – З6016, doi:10.2205/2010NZ000034.
Kobolev, V.P. Korchyn, V.A., and Burtny, P.A. (2010), "Petrophysical study of rocks at high PT-parameters and in-depth simulation of real lithosphere", *Vestnik ONZ RAN*, no2, Z6016, doi:10.2205/2010NZ000034.
3. Никитин А.Н. Особенности распространения продольных и поперечных упругих волн в текстурированных горных породах [Электронный ресурс] / А.Н. Никитин, Т.И. Иванкина, В.К. Игнатович // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – Код доступа <http://www1.jinr.ru/Preprints/2008/050%28P18-2008-50%29.pdf>. – 2008 г.
Nikitin, A.N., Ivankina, T.I. and Ignatovich, V.K. (2008), "Features of longitudinal and transverse elastic

waves in textured rocks”, *Fizika elementarnykh chastits i atomnogo yadra*, <http://www1.jinr.ru/Preprints/2008/050%28P18-2008-50%29.pdf>.

4. Никитин А.Н. Нейронография в науках о Земле / А.Н. Никитин, Т.И. Иванкина // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2004. – Т. 35. – вып. 2. – С. 349–405.

Nikitin, A.N. and Ivankina, T.I. (2004), “Neuronography in Earth Sciences”, *Fizika elementarnykh chastits i atomnogo yadra*, no.35 (2), pp. 349–405.

5. Kern, H., Popp, T. and Gorbatshevich, F. (2001), “Pressure and temperature dependence of V_p and V_s in rocks from the superdeep well and from surface analogues at Kola and the nature of velocity anisotropy”, *Tectonophysics*, issue 338, pp. 113–134.

6. Ruarri, J. Day-Stirrat, Anja M. Schleicher, Julia Schneider, Peter B. Flemings, John T. Germaine, Ben A. van der Pluijm (2011), “Preferred orientation of phyllosilicates: Effects of composition and stress on resedimented mudstone microfabrics”, *Journal of Structural Geology*, no. 33, pp. 1347–1358.

7. Геофізичні методи оцінки продуктивності колекторів нафти і газу / Продайвода Г.Т., Вижва С.А., Безродна І.М., Продайвода Т.Г. – К.: ВПЦ „Київський університет“, 2011. – 368 с.

Prodayvoda, G.T., Vyzhva, S.A., Bezrodna, I.M., Prodayvoda, T.G. (2011), *Hefizychni metody otsinky produktyvnosti kolektoriv nafty i hazu* [Geophysical Methods of Evaluation of Oil and Gas Reservoirs Performance], Kyivskiy Universytet, Kyiv, Ukraine.

Цель. Изучение закономерностей изменения типов пористости девонских карбонатных пород трех площадей Волыно-Подолья на основе результатов измерения их скоростей упругих волн и открытой пористости в условиях переменного давления.

Методика. Для экспериментальных петрофизических исследований (определение скорости продольных волн и открытой пористости) использовалась оригинальная установка ультравысоких давлений. Процесс лабораторного исследования проходил при увеличении давления от 1 до 60 МПа и обратно при его уменьшении до 1 МПа. Интерпретация лабораторных исследований проводилась с помощью оригинальной методики, которая позволяет инвертировать данные скоростей в модель структуры пустотного пространства (определить форматы пустот и их концентрацию).

Результаты. Исследованы закономерности изменения скоростей продольных волн при всестороннем сжатии образцов. Определено, что виды кривых $V_p = f(P)$ изменяются для структурно и литологически различных карбонатных пород. На основе интерпретации лабораторных данных рассчитано значение форматов пустот и их концентраций для каждого образца на различных стадиях сжатия, определена структура их пустотного пространства. На основе определения спектров пустот различных форматов и их концентраций по данным акустических исследований проведена количественная оценка вклада пористости различных типов (грануляр-

ной, трещинной, кавернозной и вторичной) в общую пористость. Определены количественные закономерности изменения типов и концентраций пустот в условиях переменного давления. Перспективность пород-коллекторов может при сжатии значительно ухудшаться и совсем утрачиваться.

Научная новизна. Заключается в использовании современной интерпретационной методики инверсии акустических данных в модель структуры пустотного пространства для изучения геологического строения карбонатных пород на основе результатов их исследований в условиях переменных давлений.

Практическая значимость. Определение структуры пустотного пространства и типов пористости карбонатных пород для условий различных давлений дает возможность выделять сложнопостроенные породы-коллекторы на больших глубинах и прогнозировать их перспективность.

Ключевые слова: скорости продольных волн, условия переменного давления, карбонатные породы, структура пустотного пространства

Purpose. Varying types of porosity patterns study of Devonian carbonate rocks of three Volyno-Podillya areas based on elastic waves velocity measurement and open porosity study under conditions of variable pressure results.

Methodology. The original facility of ultrahigh pressure has been used for experimental petrophysical investigations (measuring of the velocity of longitudinal waves and open porosity). Laboratory studies process was performed with increasing the pressure from 1 to 60 MPa and inversely at its decrease to 1 MPa. Interpretation of laboratory studies was performed using an original technique which allows inverting the data speeds into the model of the hollow space structure (to define cavities formats and their concentration).

Findings. The regularities of longitudinal waves' velocity changes under hydrostatic compression of samples were investigated. We have determined that the kinds of curves vary for carbonate rocks with different structure and lithology. Based on the interpretation of laboratory data the formats of cavities and their concentration values were calculated for each sample at various stages of compression; the structure of pore space was determined. Based on the different cavity formats specters and their concentration determination according to the data received by acoustic investigations, we have fulfilled quantitative evaluation of part of different types of porosity (granular, fractured, cavernous and secondary) in general porosity. The quantitative patterns of changes in the types and concentrations of cavities under variable pressure conditions have been determined. The exploitability of reservoir rocks under compression may significantly deteriorate and be lost completely.

Originality. We used the modern interpretive techniques of acoustic data inversion into the model of pore space structure for geological structure of carbonate rocks based on the results of their behavior under variable pressures conditions.

Practical value. Determination of the structure of pore space and porosity types of carbonate rocks under different pressure conditions makes it possible to allocate the complicated reservoir rocks at large depths and to predict their exploitability.

Keywords: *longitudinal wave velocity, variable pressure conditions, carbonate rock, hollow space structure*

Рекомендовано до публікації докт. фіз.-мат. наук Г.Т. Продайводою. Дата надходження рукопису 18.07.13.

Yuan Cao, Jingen Deng, Baohua Yu, Chao Ma

State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing, China, e-mail: yuancas555@126.com

BOREHOLE STABILITY IN STRATIFIED SHALE

Юань Цао, Цзінгень Ден, Баохуа Юй, Чао Ма

Державна головна лабораторія нафтових ресурсів і розвідки, Китайський університет нафти, Пекін, КНР, e-mail: yuancas555@126.com

СТІЙКІСТЬ СВЕРДЛОВИН У ШАРУВАТИХ ГЛИНИСТИХ СЛАНЦЯХ

Purpose. Stratified shale formation is prone to collapse in drilling. A method of precise calculation of collapse pressure should be developed to avoid severe wellbore instability of stratified shale.

Methodology. Clay mineral components of stratified shale were measured by X-ray diffraction, and microstructures of stratified shale were observed by scanning electron microscope. Shale cores had been drilled under different dip angles and then immersed in drilling fluids. Strength, cohesion and internal friction angle of stratifications and rock mass (vertical to the stratifications) were measured over different immersion time. The method suitable for calculating stratified shale strength has been developed. Based on the strength calculation method and circumferential stress distribution equation, the collapse pressure of stratified shale has been calculated.

Findings. The stratified shale is mainly composed of illite and kaolinite; and stratifications are actually 500 nm–30 μm wide microcracks (stratified shale of Weizhou formation, Beibuwan basin, South China Sea). Cohesion and internal friction angle of stratification decrease in exponential rule with immersion time, while that of the rock mass decrease in linear rule with immersion time. The rock strength decreases firstly and then increases with the dip angle (0–90°); and the lowest value occurs at the dip angle 50–60°; and single weak plane criterion is suitable for calculation of the strength of stratified shale. Contrasted to the drilling fluid density and wellbore stability situation while drilling stratified shale formation, it can be obtained that the numerical results of collapse pressure are quite precise.

Originality. Stratifications are microcracks developed in shale, and free water could seep inward shale through stratifications under capillary force. The method of calculating collapse pressure of stratified shale taking into account the seepage effect has been developed.

Practical value. The research results allow us to calculate precisely the collapse pressure of stratified shale under different deviation angles and azimuth angles. This contributes to optimization of drilling fluids density, wellbore trajectory and configuration while drilling in stratified shale.

Keywords: *shale, stratification, dip angle, hydration, single weak plane criterion, wellbore stability*

Introduction. Wellbore instability is a complex problem that commonly encountered in drilling engineering; and in 70% of cases the problem occurs in shale formation. With the surge of shale gas development, the growing number of deviate wells and horizontal wells make wellbore instability even more severe. The samples for shale hydration researches at present are mostly shale outcrop, their strength is closely related to the water content due to high content of smectite. Based on smectite hydration, relationships were established between shale strength and the factors such as water content [1], activity [2], efficiency of semi-permeable membranes [3], solute diffusion coefficient [4]. HTHP (High Temperature and High Pressure) can dehydrate smectite to illite and

kaolinite, in consequence, shale in deep formations mainly consists of non swelling clays like illite and kaolinite, water absorption of which is too low to establish an effective function of water content and shale strength. Drilling practice also indicates that deep shale formation were often with approximate parallel stratifications. To test deep stratified shale properties, experimental cores were fetched from deep shale formation and severe wellbore instability had occurred while drilling in the formation. Hydrability and strength of these cores were tested, analytical model about stability of stratified shale was created and its applicability was validated. The calculated values were used to analyze the wellbore instability and countermeasures were applied.

Materials and Methods. Core description. The cores used in the experiments were from deep stratified