

ГЕОФІЗИКА

УДК 550.552.53.553

С. Вижва, д-р геол. наук, проф., зав. кафедри геофізики,

А. Шинкаренко, асп.

E-mail: anastasiia.nesterenko@gmail.com,

І. Безродна, канд. геол. наук, с.н.с., заст. директора

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

І. Щуров, канд. техн. наук, генеральний директор,

І. Гафич, канд. геол.-мін. наук, директор з розвідки і перспективного розвитку,

Є. Солодкий, канд. геол. наук, менеджер відділу з моделювання родовищ
ТОВ "ДТЕК НАФТОГАЗ", вул. Льва Толстого, 57, м. Київ, 01032, Україна

ВПЛИВ ЗМІННОГО ТИСКУ НА АКУСТИЧНІ ТА ЄМНІСНІ ВЛАСТИВОСТІ ТЕРИГЕННИХ ПОРІД-КОЛЕКТОРІВ (НА ПРИКЛАДІ ЗРАЗКІВ СЕМИРЕНЬКІВСЬКОЇ ПЛОЩІ)

*(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.М. Карпенком)**Проведено аналіз та інтерпретацію результатів дослідження керну в умовах високих тисків з продуктивних горизонтів свердловин Семиреньківської площі Дніпровсько-Донецької западини.**Метою даної роботи є визначення особливостей зміни акустичних та ємнісних властивостей нижньокам'янувугільних теригенних порід в умовах високих тисків та якісна оцінка зміни структури їх пустотного простору в умовах стиснення та релаксації.**Колекція зразків представлена нижньокам'янувугільними пісковиками. Комплекс петрофізичних робіт проводиться в петрофізичній лабораторії ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка.**Методика досліджень: проводилося вимірювання швидкості поздовжньої хвилі та коефіцієнта відкритої пористості зразків після їх насичення моделлю пластової рідини зі збільшенням гідростатичного тиску від 0,1 до 60 МПа і зменшенням його від 60 до 0,1 МПа.**Встановлено, що швидкості пружних хвиль є більш чутливими до зміни тиску, ніж коефіцієнт пористості. Найбільші зміни цих параметрів спостерігалися при збільшенні тиску від 0,1 до 10-15 МПа. За даними проведених досліджень було якісно визначено особливості структури пустотного простору гірських порід та виділено групи зразків зі схожими розподілами типів пористості.**На основі аналізу поведінки швидкостей пружних хвиль та коефіцієнта пористості в умовах, що моделюють пластові, для горизонтів В-17, В-18 та В-19 Семиреньківської площі можна якісно прогнозувати зміну їх колекторських властивостей під час вилучення вуглеводнів та у випадку зміни глибини їх залягання по площі.**Результати проведених досліджень будуть використані для інверсії даних акустичних досліджень у параметри структури пустотного простору та для кількісної оцінки розподілу різних типів пустот у зразках.**Ключові слова: петрофізика, порода-колектор, структура пустотного простору, установка високих тисків, швидкість поздовжніх хвиль, коефіцієнт відкритої пористості.*

Вступ. У наш час значні перспективи нафтогазоносності України пов'язують із глибокозалягаючими, складнопобудованими та низькопористими колекторами нафти і газу. У зв'язку з цим досить актуальним є експериментальне вивчення фізичних властивостей порід-колекторів нафти і газу за тисків і температур, що відповідають умовам їх реального залягання. Результати таких досліджень сприяють підвищенню достовірності інтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин, дозволяють науково обґрунтовано прогнозувати скучення нафти і газу, оцінювати фільтраційно-ємнісні властивості пластів-колекторів та більш ефективно обирати методи розкриття пластів та вилучення вуглеводнів.

Велике значення для підвищення інформативності петрофізичних досліджень мають роботи з фізичного та математичного моделювання петрофізичних параметрів [4] в умовах великих глибин, використання для цього сучасних методів планування експериментів та імовірно-статистичних методів обробки експериментальних даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивченням петрофізичних та деформаційно-міцнісних властивостей порід-колекторів нафти і газу в умовах великих глибин займалося багато дослідників. Зокрема, великий внесок у дослідження петрофізичних параметрів гірських порід в умовах, близьких до пластових, зробили Г.М. Авчян, Д.А. Антонов, Б.В. Байдюк, Є.І. Баюк, Я.Н. Басін, І.М. Безродна, Б.Ю. Вендельштейн, С.А. Вижва, М.П. Воларович, Р.С. Гімаєв, І.Ф. Глузов, В.І. Грицишин, В.М. Дахнов, В.М. Добринін,

Н.В. Дортман, В.М. Ільїнський, В.Ф. Індутний, С.С. Ітенберг, М.К. Калинко, Т.Т. Клубова, В.О. Корчин, Д.І. Кузьмичов, Б.М. Куліков, Т.С. Лебедев, Ю.А. Лімбергер, Є.Е. Лук'янов, Л.М. Марморштейн, Я.Р. Морозович, М.Ю. Нестеренко, В.А. Новгородов, Л.П. Орлов, Е.І. Пархоменко, В.І. Петерсільє, Г.І. Петкевич, Г.Т. Продайвода, Ю.В. Різніченко, З.І. Стаховська, З.Б. Стефанкевич, В.О. Федішин, О.А. Фомін, Г.Д. Ушаков, А.А. Ханін, О.В. Шеремета, Г.А. Шнурман, В.П. Якушев, а також Ф. Берч, М. Біо, В. Брейс, П. Бриджмен, Дж. Волш, Ф. Джоунс, К. Гренвіль, Д. Девіс, І. Карпентер, Дж. Ладефру, А. Летчі, З. Прос, Г. Спенсер, М. Уайлі, І. Фетт, П. Хемсток, Х. Холл, Ф. Юнг та ін. В їх роботах досліджувалися пружні та незворотні деформації скелету породи, коефіцієнти стискуваності, пористості, проникності при високих тисках і температурах, та були встановлені загальні закономірності зміни властивостей різних типів порід з ростом термобаричних параметрів і петрофізичні зв'язки основних фізичних параметрів зі структурними та речовинними характеристиками порід.

В Україні питання впливу термобаричних умов на петрофізичні властивості гірських порід та дослідження порід-колекторів в умовах, що моделюють пластові, вивчені недостатньо і основні дослідження у цьому напрямку представлені роботами І.М. Безродної, С.А. Вижви, Г.Т. Продайводи (вплив тиску на акустичні та електричні параметри гірських порід), С.Д. Федоришина (вплив тиску і температури на електропровідність складнопобудованих порід-колекторів),

В.В. Рябухи (вплив тиску, що моделює пластовий, на електричні властивості порід), В.П. Коболева та О.Ю. Корчина (вплив термобаричних умов на кристалічні гірські породи).

Приведення гідродинамічних розрахунків показників розробки родовищ нафти і газу передбачає врахування впливу змін пластового тиску на колекторські властивості порід та реальних процесів, що відбуваються в пласті при змінах тиску. Це особливо актуально для глибокозалягаючих родовищ, де відносна роль впливу пластового тиску на фізичні властивості порід-колекторів помітно зростає. Для таких задач зазвичай використовують дані експериментальних досліджень керну на установці високого тиску (УВТ) [1].

Численними дослідженнями встановлено, що пористість зменшується зі зростанням усебічного тиску, що пояснюється ущільненням породи та зменшенням розмірів пустот. При неповному водонасиченні зразка ущільнення веде до перерозподілу води в пустотах та зростання насичення пустот водою. Таким чином, зростання всестороннього тиску викликає зміни геометрії пустотного простору та розподілу флюїду в пустотах.

Зміна пористості порід під тиском пов'язана зі зміною пустотного об'єму, що залежить від ступеня цементованості породи, типу цементациї, складу цементу, відсортованості та обкатаності зерен та уламків мінералів тощо. Під дією тиску в породах чи пластах можуть відбуватися незворотні деформації пов'язані, в основному, з руйнуваннями, деформаціями та переупаковкою зерен мінералів. Для слабкоцементованих порід незворотні зміни пористості можуть сягати 50% [2].

При збільшенні тиску від 0,1 до 40 МПа пористість може зменшуватися до 90 ÷ 93% свого початкового значення, при чому основне зниження пористості припадає на тиски 0,1 ÷ 15 МПа і пов'язане із закриттям тріщин та мікротріщин. Для вищих тисків, за рахунок зростання ущільненості породи, спостерігається більш повільне зменшення пористості. При зростанні вмісту глинистої фракції в породах вплив ефективного тиску на пористість і проникність проявляється сильніше [10, 15]. Для погано відсортованих пісковиків зменшення пористості може сягати 20% за тисків близько 150 МПа, а в щільних аргілітах при тому ж тиску – близько 6% [9].

Л.М. Марморштейн [13] зафіксував зміни коефіцієнта пористості, що сягали 40%, при дослідженні пісковиків з базальним та базально-поровим типом цементу в умовах ізотермічного всебічного стискання до 50 ÷ 60 МПа. Це нехарактерно для цементованих піщано-глинистих порід при пружних деформаціях, і може бути пов'язано з незворотними деформаційними явищами в породах.

Встановлено [18], що в процесі розробки родовищ тріщинна пористість сильно зменшується під впливом усебічного тиску, і величина її зменшення залежить від виснаження колектора. Однак, також експериментально підтверджено, що, незважаючи на значне зниження, тріщинна пористість може бути присутня в породі навіть за тиску 140 МПа, а практично повне "залічування" тріщин спостерігається для більшості порід при величині тиску 280 МПа.

Як відмічено вище, зростання усебічного тиску (при незмінному поровому) чи збільшення ефективного тиску призводить до стискання пустотного простору, зменшення поперечного перерізу пустот та закриття порових каналів і тріщин. Експериментально було встановлено [21, 23], що швидкість повздовжньої хвилі більша вздовж нашарування, ніж уперек і суттєво зростає зі збільшенням тиску чи водонасичення. Зі зростанням усебічного тиску з атмосферного до 20 ÷ 23 МПа, швидкості можуть зростати на 25 ÷ 30% для зразків, вирізаних пер-

пендикулярно до нашарування, і на 18 ÷ 30% для зразків, вирізаних паралельно до нашарування, що говорить про значну акустичну анізотропію. Якщо пустоти в зразку орієнтовані хаотично, зростання швидкостей під впливом гідростатичного тиску не залежить від напрямку вимірювання. Усебічний тиск та водонасичення сприяють зростанню не лише швидкості повздовжньої хвилі, а і амплітуди та частоти ультразвукового сигналу. Значення, отримані для зростаючого тиску (прямий хід – ПХ), зазвичай відрізняються від отриманих для спадаючого тиску (зворотній хід – ЗХ) через присутність незворотних деформацій у зразках порід [16, 20, 21].

Якісно вплив тиску до 250 МПа на швидкість для зразків пісковиків, алевролітів, вапняків і глин неоднаковий. Реакція швидкостей пружних хвиль на зростаючий тиск нелінійна, при чому основні зміни спостерігаються в інтервалі від атмосферного тиску до 50 ÷ 100 МПа, що пов'язано із закриттям мікротріщин, тонких пустот на контактах зерен та найбільш нестійких пустот, що веде до загального зростання міцності породи. При подальшому зростанні тиску градієнт збільшення швидкості зменшується і крива залежності $V_p(P)$, як правило, прямує до асимптоти. Зокрема, за тисків вище 200 МПа швидкість зростає повільно, в інтервалі від 200 до 1500 МПа вона, зазвичай, зростає лише на 3-8% і це пов'язано, основною мірою, з ущільненням породи та контактів між зернами мінералів і подальшим закриттям мікротріщин [3, 11, 17, 19, 21].

Як зазначено у багатьох роботах, для теригенних порід важливе значення має мінеральний склад та структура цементу порід, оскільки ці фактори визначають поведінку в процесі деформації. Мінімальна зміна швидкості зі збільшенням тиску спостерігається в уламкових породах, цементованих кварцовим, опаловим, карбонатним або кременистим цементом, а найбільші – за наявності глинистого цементу базального типу. Тому для пісковиків та алевролітів, в яких присутній цемент глинистий базального та контактового типу, характерне більш сильне стискання пустот та, відповідно, (за однакової пористості з пісковиками, що цементовані опаловим цементом) менші значення V_p та більший діапазон зміни V_p в залежності від зміни тиску [3, 19, 22, 23].

Вплив тиску на інтервальний час пробігу пружної хвилі має наступний характер: найменше він змінюється для низькопористих порід, найбільше (близько 40 ÷ 50%) – для високопористих. Останні є слабкоцементованими, тому підвищення усебічного стискання призводить до покращення акустичного контакту між окремими зернами, і, відповідно, до різкого скорочення часу проходження акустичних хвиль [14].

Метою даної роботи є визначення особливостей зміни акустичних та емісійних властивостей нижньокам'яновугільних теригенних порід зі свердловин Семиренківської площі ДДЗ в умовах високих тисків та якісна оцінка зміни структури їх пустотного простору в умовах стиснення та релаксації.

Методика досліджень. Для експериментальних петрофізичних досліджень в умовах змінних тисків використовувався оригінальна УВТ, яку було сконструйовано в ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка. УВТ дає можливість змінювати всесторонній тиск від 0,1 МПа до 100 МПа, а внутрішньопоровий від 0,1 до 5 МПа і реєструвати швидкості поздовжніх пружних хвиль, електричний опір зразків та визначати зміну відкритої пористості зразків завдяки контролю за зміною об'єму зразка.

Принцип знаходження швидкостей пружних хвиль полягає в тому, що в спеціальну манжету із вулканізованої гуми поміщається зразок у формі циліндра з ді-

метром 30 мм та довжиною 30 мм, насичений моделлю пластової рідини. Ультразвукові датчики розміщуються по двох паралельних площинах циліндра. Через визначений інтервал часу в установці змінюють тиск та вимірюють час проходження пружних хвиль через зразок, на основі чого розраховують їх швидкості [12].

Процес лабораторного дослідження можна розділити на два етапи: під час першого етапу тиск збільшувався від 0,1 МПа до 60 МПа за кроком 5 МПа (ПХ), а під час другого – зменшувався від 60 МПа до 0,1 МПа (ЗХ). Величина максимального тиску визначалася глибиною залягання окремих горизонтів та ефективними тисками, замірними у свердловині.

Результати. У роботі проводився аналіз результатів дослідження петрофізичних параметрів в умовах змінних тисків колекції з 43-х зразків Семиренківської площі ДДЗ. Зокрема, досліджувалися швидкості поздовжніх хвиль та коефіцієнт відкритої пористості зразків (з продуктивних горизонтів В-17, В-18, В-19 свердловин №№ 16, 18, 21 та 67). Літологічно зразки представлені пісковиками та алевритистими пісковиками, які стратиграфічно відносяться до візейського ярусу нижнього карбону. Зразки відібрані в інтервалах глибин від 5216 м до 5617 м.

На основі отриманих даних були побудовані графіки залежності швидкостей поздовжніх хвиль від тиску ($V_p = f(P)$) для прямого та зворотного циклів вимірювань, а також графіки залежностей коефіцієнта відкритої по-

ристості від прикладеного тиску ($K_n = f(P)$). Також було побудовано графіки залежності швидкості поздовжніх хвиль від коефіцієнта відкритої пористості для відповідних значень тисків.

Швидкості поздовжніх хвиль для досліджуваних зразків в атмосферних умовах змінюються від 3600 м/с до 5380 м/с. За тиску 60 МПа швидкості тих самих зразків збільшилися і змінюються в межах $4440 \div 6560$ м/с, причому інтенсивність зміни швидкості не залежить від її початкового значення, а визначається, в першу чергу, структурою пустотного простору, літологією та текстурно-структурними особливостями зразків. Найбільше значення швидкості в атмосферних умовах характерне для зразка № 9193 ($V_p = 5380$ м/с) з $K_n = 1,4\%$, найменше – для № 9217 ($V_p = 3600$ м/с) з $K_n = 13,2\%$.

На основі аналізу результатів дослідження встановлено, що загалом збільшення тиску призводить до зростання швидкості проходження поздовжньої хвилі крізь зразок, однак це зростання нелінійне, і неоднакове для різних зразків. Для деяких зразків (наприклад для зразка № 6180) спостерігається стрімкий стрибок на перших 5 МПа і поступове подальше зростання; а для інших (наприклад, № 9234) – поступове зростання протягом усього циклу вимірювань; для третьої групи зразків (таких як № 9227) – невелике пониження на перших 5 МПа і зростання при подальшому збільшенні тиску (Рис. 1).

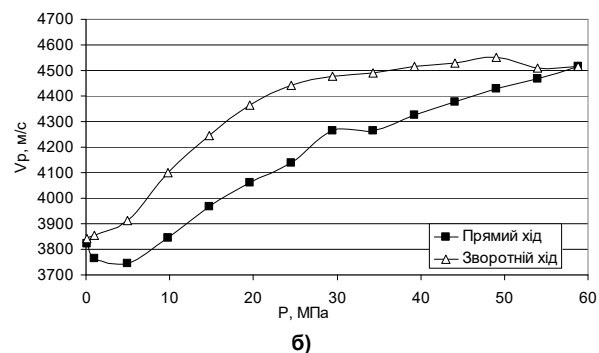
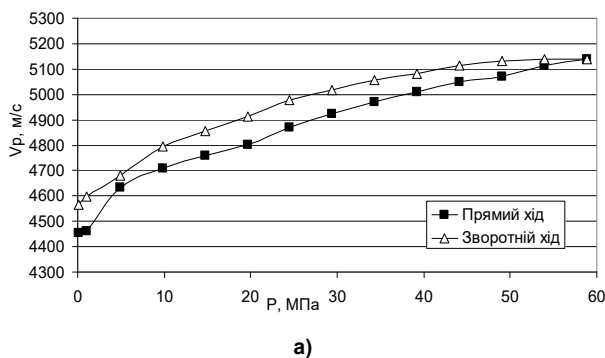


Рис. 1. Вплив тиску на швидкість поздовжньої хвилі для різних зразків керну: а) зразок № 6180 (горизонт В-18, св. № 16); б) зразок № 9227 (горизонт В-19, св. № 67)

Найменші градієнти збільшення швидкості при збільшенні тиску до 60 МПа спостерігаються для зразків №№ 6174, 9163, 9164, 9208, 9242, 9283, 9295, а найбільші – для зразків №№ 9186, 9193, 9221, 9228, 9245, 9268. Для деяких зразків, як, наприклад, 9163, 9185, 9186, 9208, 9288, 9291, 9308, 9313, на перших 5-10 МПа стискання присутнє невелике пониження швидкості, яке, скоріше за все, пов'язане з деформаціями скелету зразка.

Для деяких зразків (9193, 9206, 9227, 9254) характерне значне відхилення (до 300-700 м/с) кривих ПХ від кривих ЗХ (Рис. 1, б), що свідчить про значні зміни структури пустотного простору. А для більшості зразків розходження значень швидкості для ПХ і ЗХ значно менші (максимум – 200 м/с), що свідчить про несильні та неруйнівні зміни в породі, а також про стабільність структури пустотного простору.

Зафіксоване на кривих стрімке зростання швидкості поздовжніх хвиль в гірських породах в умовах стискання пов'язане з наявністю тріщин та мікротріщин у зраз-

ках. Присутність кількох стрибків зміни кривої $V_p = f(P)$ може вказувати на наявність кількох систем тріщин або інші особливості структури породи, які потребують більш детального вивчення.

Стрибокподібне та нерівномірне зростання швидкості (як, наприклад, у зразках 9193, 9208) дозволяє говорити про складний характер пустотного простору та можливі зміни типів пористості на різних етапах стискання (Рис. 1).

Результати досліджень на УВТ, зокрема, залежності $V_p = f(P)$, також було використано для екстраполяції швидкості поздовжніх хвиль для відібраних зразків на більш високі ефективні тиски (Рис. 2). Отримані дані можуть бути використані для прогнозу значення $V_p(P)$ для порід зі схожою будовою та літологією без проведення лабораторних досліджень або для прогнозу тисків на різних глибинах за відомих швидкостей поздовжніх хвиль та літології геологічного розрізу.

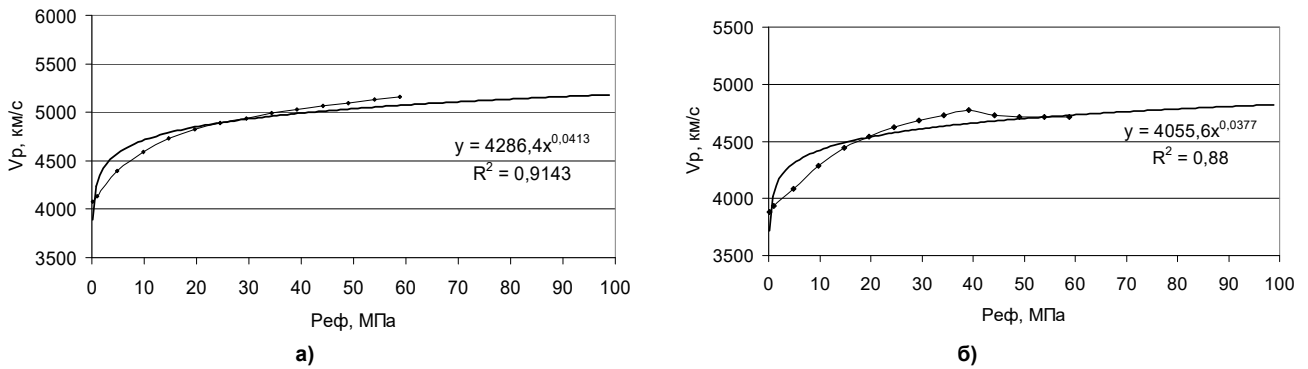


Рис.2. Моделювання зміни швидкості поздовжньої хвилі у зразках зі зміною глибини їх залягання:

а) зразок 9245 (горизонт В-19, св.№ 67, глибина відбору – 5495 м);
 б) зразок 9268 (горизонт В-19, св.№67, глибина відбору – 5506 м)

Коефіцієнти відкритої пористості зразків, виміряні в атмосферних умовах, змінюються в межах $1,4 \div 13,2 \%$, а після накладання тиску в 60 МПа ці межі змінилися до $0,6 \div 12,4 \%$. Найбільше значення коефіцієнта пористості в атмосферних умовах характерне для зразка № 9217 (13,2 %), найменше – для № 9193 (1,4 %). На рис. 3 наведено приклад зміни коефіцієнта пористості для двох зразків. Якісно криві залежності $K_n = f(P)$ подібні для більшості зразків.

Враховуючи криву зміни коефіцієнта пористості зі збільшенням тиску та відсутність на ній стрибків, можна говорити про досить рівномірне зменшення об'єму поротот, що відповідає ситуації, коли спочатку закриваються тріщини та мікротріщини, а потім гранулярні та перехідні пороти, яких у породі, зазвичай, більше, і для "закриття" яких потрібно прикладати більші зусилля.

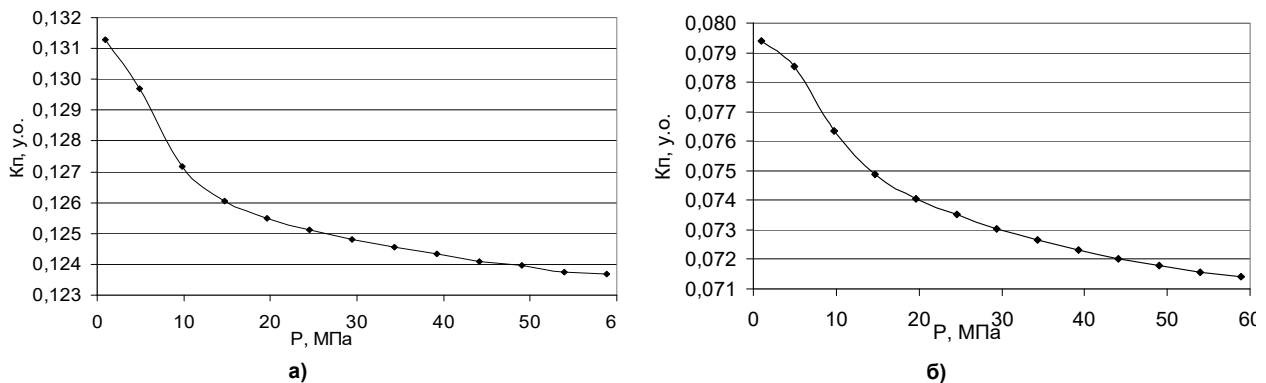


Рис.3. Вплив тиску на коефіцієнт відкритої пористості для різних зразків керну:

а) залежність $K_n(P)$ для зразка 9254, горизонт В-19, св.№67; б) залежність $K_n(P)$ для зразка 9235, горизонт В-19, св.№67

Встановлено, що характер зміни коефіцієнта відкритої пористості від тиску не завжди відповідає характеру зміни швидкості поздовжньої хвилі від тиску – коефіцієнт пористості зазвичай зменшується плавно, без стрибків, у той час як швидкість може зростати стрибкоподібно, іноді навіть трохи знижуватися на перших кроках стискування. Це пов'язано з тим, що крива зміни коефіцієнта пористості характеризує лише зміну загального об'єму відкритих порот, а крива зміни швидкості поздовжньої хвилі якісно відображає і зміну форматів порот та співвідношення різних типів пористості.

Таким чином, швидкість поздовжніх хвиль є більш чутливою до зміни тиску, ніж коефіцієнт пористості. Зокрема, для наведеної вище групи зразків відносні зміни K_n складають $4,9 \div 12,5 \%$, а $V_p - 13,7 \div 23,8 \%$.

Залежності $V_p = f(P)$ та $K_n = f(P)$ для досліджених зразків апроксимовані авторами степеневими функціями виду $V_p = V_{p0} P^a$ та $K_n = K_{n0} P^b$ (де K_{n0} – коефіцієнт пористості породи в атмосферних умовах, а V_{p0} – швидкість поздовжньої хвилі в зразку в атмосферних умовах, або дуже близьке до неї значення) з високими значеннями коефіцієнта достовірності апроксимації.

На основі аналізу та систематизації результатів петрофізичного вивчення колекції зразків та форм кривих залежностей $V_p = f(P)$, $K_n = f(P)$ та $V_p(P) = f(K_n(P))$ серед них було виділено групи з однотипною поведінкою петрофізичних параметрів в умовах, що моделюють пластові, та якісно визначено головні особливості структури їх пустотного простору.

В межах кожного з досліджуваних продуктивних горизонтів В-17, В-18 та В-19 для свердловин 16, 18, 21 та 67 можна виділити по 2-3 групи зразків з подібною структурою пустотного простору та подібною її зміною під впливом змінного тиску. Зокрема, в породах горизонту В-19 для свердловини № 67 виділено три групи зразків і по дві групи – для свердловин № 21 та № 18, породи яких надалі можна розглядати як близькі за структурою пустотного простору та колекторськими властивостями.

Зв'язку між віднесенням зразка до певної групи та глибиною його відбору не встановлено. Ймовірно, для зразків в межах кожної групи є зв'язок з типом цементу та структурно-текстурними особливостями порід, однак ці дані потребують уточнення та більш глибокого дослідження зразків.

Для горизонтів В-17 та В-18 у свердловині № 16 також було виділено по дві групи зразків зі схожими властивостями, однак вони є менш представницькими через меншу кількість зразків, тому надалі розглянемо лише породи горизонту В-19.

Авторами, зокрема, виділено групу зразків з подібною структурою пустотного простору для горизонту В-19 свердловини №67 Семиреньківської площі, що представлена зразками №№ 9220, 9242, 9254 та 9288. Дана група зразків характеризується наступними особливостями:

однаковий літологічний склад – усі зразки представлені пісковиками;

діапазон зміни швидкостей поздовжніх хвиль: $3720 \div 5064$ м/с;

зразки мають досить високе значення коефіцієнта пористості – в межах 7,1-13,1 %;

форма кривої залежності $V_p = f(P)$ дуже близька для всіх зразків і характеризується рівномірним зрос-

танням швидкості під час ПХ та рівномірним зменшенням під час ЗХ, а також незначним розходженням кривих для ПХ та ЗХ;

різниця між швидкостями поздовжніх хвиль для ЗХ та ПХ на однакових тисках в межах 275 м/с.

На основі наведених особливостей можна говорити про те, що досліджена група зразків представлена колекторами з невеликою присутністю тріщинної пористості (або переважно пористістю пустот, близьких до гранулярних). Під час дії на породу пластових умов частка незворотних деформацій у ній дуже мала.

На рис. 4 представлено графіки залежностей $V_p = f(P)$, $K_n = f(P)$ та $V_p(P) = f(K_n(P))$ для описаної вище групи зразків №№ 9220, 9242, 9254 та 9288 та приклад апроксимації залежностей між параметрами для зразка № 9254 степеневими функціями з наведеними рівняннями та значеннями коефіцієнтів достовірності апроксимації.

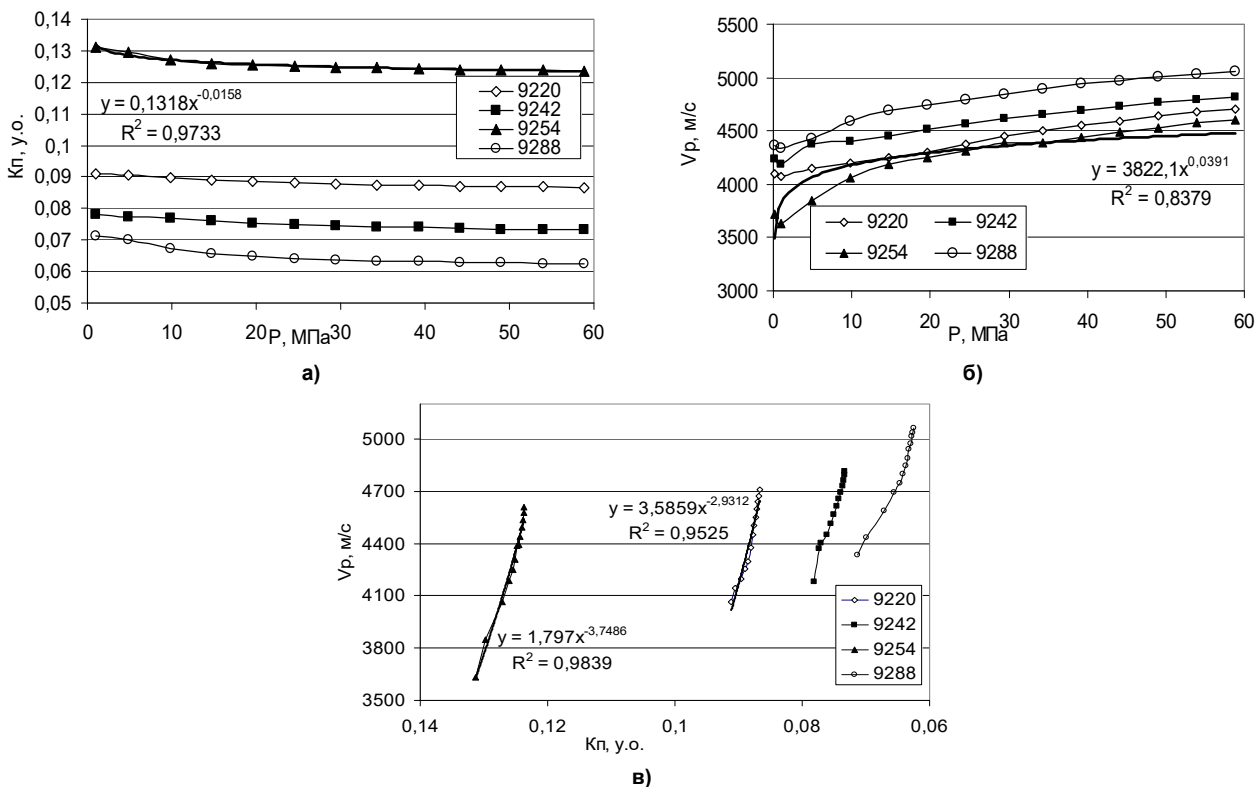


Рис. 4. Вплив тиску на коефіцієнт відкритої пористості (а), швидкість поздовжніх хвиль (б) для одної з груп зразків горизонту В-19 св.№67, та залежність між швидкістю поздовжніх хвиль і коефіцієнтом пористості (в) для змінних тисків

Для ілюстрації відмінності між різними групами зразків в межах одного горизонту та однієї свердловини на рис. 5 наведено залежності $V_p(P) = f(K_n(P))$ для різних груп зразків горизонту В-19 свердловин №№ 18, 21 і 67 Семиреньківської площі.

Очевидно, що для різних груп зразків характерний різний характер залежностей між петрофізичними параметрами в різних баричних умовах – швидкість може зростати і спадати плавно чи стрибкоподібно, при чому стрибки при прямому циклі вимірювань зазвичай (як і в дослідженнях інших авторів [2, 10, 11, 15, 17, 19, 22, 23]) зустрічаються за тисків 0,1 ÷ 15 МПа і відповідають закриттю пустот різних типів, в основному, тріщин та різкій зміні розмірів інших пустот.

Імовірно, що між групами кожного з горизонтів для різних свердловин можна встановити кореляцію, однак,

для цього потрібні більш детальні дані стосовно геологічного розрізу в свердловинах та кореляція відкладів за глибиною за даними ГДС та буріння.

На рис. 5 проілюстровано, що характер залежності швидкості поздовжніх хвиль та коефіцієнта пористості в умовах зростаючого навантаження на породу досить складний і відрізняється для зразків з різними літологічними та структурними особливостями. Окрім того, графіки $V_p(P) = f(K_n(P))$ дають змогу якісно визначати вміст різних типів пористості за стрибками та перегинами кривих. Для зразків 1 групи свердловини № 67 спостерігається невелике пониження швидкості на перших кроках стискування на фоні загального зменшення пористості (Рис. 5, а). Це свідчить про одночасне ущільнення та незначне руйнування в породи, причому вплив руйнування на цьому етапі переважає вплив закриття пустот.

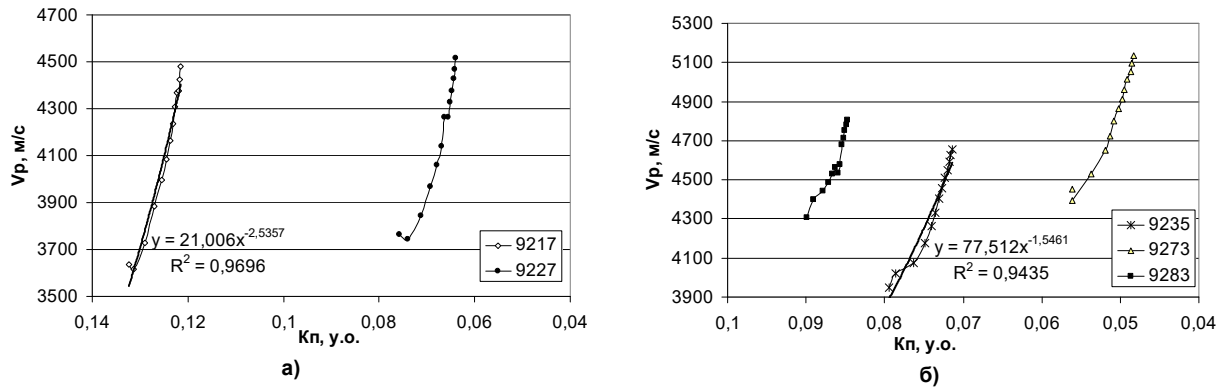


Рис. 5. Приклад залежностей між швидкістю поздовжніх хвиль і коефіцієнтом пористості для змінних тисків для зразків різних груп горизонту В-19:

а) група 1, свердловина №67; б) група 2, свердловина №67

В інших групах спостерігається наростання швидкості поздовжніх хвиль зі зменшенням пористості, однак для всіх груп зразків у певний момент стискання спостерігається стрибок або зміна кута нахилу кривої, що може говорити про закриття тріщин та перехід до поступового закриття гранулярних (або близьких до них)

пустот, або ж перехід домінуючої ролі від одного типу пустот до іншого (Рис. 4, в; 5, б).

Для уточнення типів пустот та їх зміни при зміні тиску у подальшому авторами буде проведено кількісну оцінку розподілу пустот різних форматів.

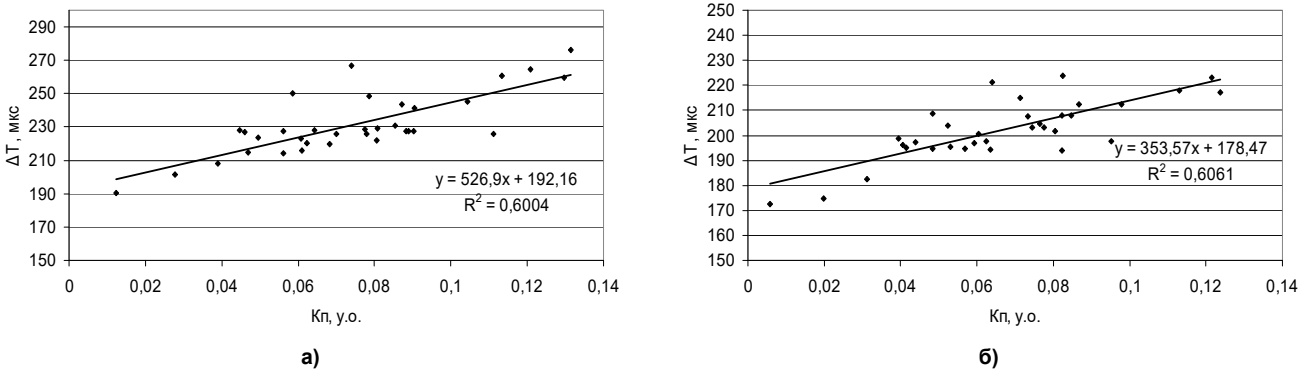


Рис.6. Приклад залежностей між інтервальним часом пробігу поздовжніх хвиль та коефіцієнтом відкритої пористості для теригенних зразків Семиренківської площі (інтервал глибин 5482-5617 м горизонтів В-17, В-18, В-19 свердловин 18, 21, 67): а) тиск 5 МПа; б) тиск 60 МПа

На основі аналізу залежностей $V_p(P) = f(K_n(P))$ для досліджуваних зразків було побудовано графіки $\Delta T = f(K_n)$ для кожного рівня стискання (Рис. 6) та визначено лінійні функції, що описують залежність між цими параметрами, і коефіцієнти достовірності апроксимації (Табл. 1).

теригенних порід Семиренківської площі в умовах високих тисків (до 60 МПа) та аналіз отриманих результатів.

Висновки та перспективи розвитку напряму. У представленій роботі показано результати комплексного дослідження та систематизації петрофізичних властивостей

За кривими залежності швидкості поздовжніх хвиль і відкритої пористості від тиску було визначено групи зразків з подібними акустичними та ємнісними властивостями. Як критерії для виділення груп було використано градієнти зміни швидкості поздовжніх хвиль та коефіцієнтів пористості при зміні тиску; розходження кривих ПХ та ЗХ, значення V_p та K_n в атмосферних умовах.

Таблиця 1. Кореляційні рівняння, отримані для опису залежності $\Delta T = f(K_n)$ для зразків Семиренківської площі за різних рівнів стискання

Тиск, МПа	$\Delta T = f(K_n)$	R2
0,1	$y=609,84x+189,32$	0,68
1	$y=579,11x+192,67$	0,65
5	$y=529,9x+192,16$	0,60
10	$y=469,06x+192,12$	0,57
15	$y=429,74x+190,77$	0,57
20	$y=403,31x+189,56$	0,56
25	$y=387,9x+187,5$	0,56
30	$y=376,32x+186,08$	0,58
35	$y=365,29x+185,05$	0,57
40	$y=364,07x+183,11$	0,58
45	$y=365,19x+181,51$	0,60
50	$y=367,43x+180,05$	0,61
55	$y=358,61x+179,28$	0,60
60	$y=353,57x+178,47$	0,61

Також було якісно визначено співвідношення різних типів пористості у зразках на різних стадіях стискання, а саме – зменшення вмісту тріщинної пористості зі стисканням і закриттям основної частини тріщин за тисків $0,1 \div 15$ МПа. На основі отриманих результатів встановлено можливість погіршення колекторських властивостей порід-колекторів під час їх ущільнення (за умови зменшення загальної пористості та відсутності нових проникиних каналів).

Показано, що під час розробки родовищ (в умовах збільшення ефективного тиску) можна очікувати відносні зміни пористості до $4,9 \div 12,5\%$ та швидкості поздовжніх хвиль до $13,7 \div 23,8\%$.

Дані дослідження зміни швидкості поздовжніх хвиль зразків при зміні тиску було екстрапольовано в область більших ефективних тисків, що дозволяє прогнозувати ємнісні параметри подібних порід за інших умов залягання.

Результати проведених досліджень можуть бути використані для визначення перспективності порід різного літологічного складу, моделювання їх властивостей для різних глибин залягання та кількісного визначення структури їх пустотного простору.

Авторами отримані залежності між швидкостями поздовжніх хвиль, інтервальними часами пробігу поздовжніх хвиль, коефіцієнтами пористості та баричними умовами (які відповідають різним глибинам залягання порід), що можуть бути використані для уточнення інтерпретації даних ГДС для досліджуваної площі.

За допомогою оригінальної методики, розробленої в ННІ "Інститут геології" [5, 6, 7, 8, 11], авторами планується використати отримані дані для кількісної оцінки структури пустотного простору порід та, відповідно, визначення перспективності порід-колекторів.

Список використаних джерел

- Абасов М.Т. О влиянии пластового давления на изменение фильтрационно-емкостных свойств терригенных пород-коллекторов в процессе разработки месторождений нефти и газа / М.Т. Абасов, Р.Д. Джебваншир, А.А. Иманов, Г.И. Джалалов. // Геология нефти и газа. – 1997. – №5. – www.geolib.ru.
- Авчян Г. М. Петрофизика осадочных пород в глубинных условиях / Г.М. Авчян, А.А. Матвеев, З.Б. Стефанкевич. – Москва: Недра, 1979. – 224 с.
- Баюк В.П. Физические свойства коллекторов нефти при высоких давлениях и температурах: сборник статей / Под ред. В.П. Баюк. – Москва, 1965.
- Безродна І. Математичне моделювання впливу мінерального складу та пористості на параметри пружної анізотропії складнопобудованих терригенних порід Волино-Поділля / І. Безродна, Д. Безродний, Р. Голяк. // Вісник Київського університету, серія Геологія. – 2016. – №73. – С.27-32.
- Безродна І. Оцінка структури пустотного простору низькопористих порід Зарічної площі за результатами петрофізичних та геофізичних досліджень / І. Безродна, А. Шинкаренко. // Вісник Київського університету, серія Геологія. – 2015. – №69. – С. 53–58.
- Безродна І.М. Оцінка структури пустотного простору карбонатних порід за результатами акустичних досліджень в умовах змінного тиску / І.М. Безродна. // Вісник НГУ. – 2014. – С. 21-25.
- Безродна І.М. Прогноз колекторських властивостей терригенних порід-колекторів за результатами акустичних досліджень в умовах змінного тиску (на прикладі Володимирської площі Волино-Поділля) / І.М. Безродна. // Вісник Харківського національного університету. Серія "геологія – географія – екологія". – 2015. – № 1128(41). – С.21-25.
- Вижва С. Кількісна оцінка структури пустотного простору терригенних порід за результатами досліджень в умовах змінного тиску зразків Сушнівської площі Волино-Поділля / С. Вижва, І. Безродна, О.Демченко. // Матеріали XIth International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects. 2012.
- Гиматудинов Ш.К. Физика нефтяного и газового пласта: учебник / Ш.К Гиматудинов. – 2-е изд, перераб. и доп. – Москва: Недра, 1971. – 312 с.
- Григорьев Б.В. Влияние изменения эффективного давления на фильтрационно-емкостные свойства пород-коллекторов / Б.В. Григорьев, А.А. Шубин. // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2015. – Т. 1, №2(2). – С. 15-21.
- Дортман Н.Б. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика. / Под ред. Н. Б. Дортман. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 455 с.
- Комплексні геолого-петрофізичні дослідження складнопобудованих порід-колекторів східного схилу Львівського палеозойського про-

гину: звіт з НДР / С. А. Вижва, Г. Т. Продайвода, І. М. Безродна та ін. – Київ, 2011. – 594 с.

13. Мarmorштейн Л.М. Влияние горного давления на электрическое сопротивление и коэффициент пористости горных пород (на примере Чайдахского разведочного участка Нордвикского района): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук / Л.М. Мarmorштейн. – М., 1962.

14. Орлов Л.И. Влияние термобарических условий на зависимость между интервальным временем, электрическим сопротивлением и пористостью пород нижнемеловых отложений Даулетабад-Донмезского месторождения / Л.И. Орлов, В.Г. Топорков, Е.Ф. Жук, Л.В. Конькова. // Геология нефти и газа. – 1981. – №08.

15. Ali H.S. The effect of overburden pressure on relative permeability / H.S. Ali, M.A. Al-Marhoun, S.A. Abu-Khamsin, M.S. Celik. // SPE 15730. – 1987. – P. 335-340.

16. Birch F. The Velocity of Compressional Waves in Rocks to 10 Kilobars, Part 1 / F. Birch. // Journal of Geophysical research. – 1960. – V. 65, №4. – P. 1083–1102.

17. Gueguen Y. How cracks modify permeability and introduce velocity dispersion: Examples of glass and basalt / Y. Gueguen, M. Adelinet et al. // The Leading Edge. – 2011. – V. 30, №12. – P. 1392-1398.

18. McLatchie S. The Effective Compressibility of Reservoir Rock and Its Effects on Permeability / S. McLatchie, R.A. Hemstock, J.W. Young. // Journal of petroleum technology. – 1958. – №10(6). – P. 49-51.

19. Pros Z. Laboratory Approach to the Study of Elastic Anisotropy on Rock Samples / Z. Pros, T. Lokajicek, K. Klima. // Pure and Applied Geophysics, Birkhauser Verlag. – 1958. – №10(6). – P. 619–629.

20. Schon J.H. Handbook of Petroleum Exploration and Production. Physical Properties of Rocks: a Workbook / J.H. Schon. – Elsevier, 2011. – 481 p.

21. Simmons G. Velocity of Shear Waves in Rocks to 10 Kilobars, 1 / G. Simmons. // Journal of Geophysical Research. – 1964. – V.69, №6. – P. 1123-1130.

22. Todd T. Effect of Pore Pressure on the Velocity of Compressional Waves in Low-Porosity Rocks / T. Todd, G. Simmons. // Journal of geophysical research. – 1972. – 77, №20. – P.3731-3743.

23. Yu G. Effects of Confining Pressure and Water Saturation on Ultrasonic Compressional Wave Velocities in Coals. Int. 3 / G. Yu, K. Vozoff, D. W. Durney. // Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. – 1991. -V. 28, №6, – P. 515-522.

References

- Abasov, M.T., Dzhevanshir, R.D., Imanov, A.A., Dzhahalov, G.I. (1997). O vliianii plastovogo davleniia na izmenenie filtratsionno-emochnykh svoystv terrigenykh porod-kollektorov v protsesse razrabotki mestorozhdenii nefiti i gaza. Geologiya nefiti i gaza, 5. www.geolib.ru. [in Russian].
- Avchian, G. M., Matveenko, A.A., Stefankevich, Z.B. (1979). Petrofizika osadочnykh porod v glubinykh usloviakh, Moskva: Nedra, 224 p. [in Russian].
- Baiuk, V.P. (1965). Fizicheskie svoystva kollektorov nefiti pri vysokikh davleniiah i temperaturakh. Sbornik statei. Pod red. V.P. Baiuk. Moskva. [in Russian].
- Bezrodna, I., Bezrodnyi, D., Holiaka, R. (2016). Matematychnе modeliuвання vplyvu mineralnogo skladu ta porystosti na parametry pruzhnoi anizotropii skladnopobudovanykh terrihennykh porid Volyno-Podillia. Visnyk Kyivskoho universytetu, seria Heolohiia, 73, 27-32. [in Ukrainian]. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.73.04>.
- Bezrodna, I., Shynkarenko, A. (2015). Otsinka struktury pustotnogo prostoru nyzkoporystykh porid Zarichnoi ploshchi za rezul'tatamy petrofizychnykh ta heofizychnykh doslidzhen. Visnyk Kyivskoho universytetu, seria Heolohiia, 69, 53–58. [in Ukrainian]. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.69.08.53-58>.
- Bezrodna, I.M. (2014). Otsinka struktury pustotnogo prostoru karbonatnykh porid za rezul'tatamy akustychnykh doslidzhen v umovakh zminnogo tysku. Visnyk NHU, 21-25. [in Ukrainian].
- Bezrodna, I.M. (2015). Prohnoz kolektor'skykh vlastyvoستي terrihennykh porid-kolektoriv za rezul'tatamy akustychnykh doslidzhen v umovakh zminnogo tysku (na prykladi Volodymyr'skoi ploshchi Volyno-Podillia). Visnyk Kharkivskoho natsionalnogo universytetu. Seria "heolohiia – heohrafiia – ekolohiia", 1128(41), 21-25. [in Ukrainian].
- Vyzhva, S.A., Bezrodna, I.M., Demchenko O. (2012). Kil'kiska otsinka struktury pustotnogo prostoru terrihennykh porid za rezul'tatamy doslidzhen' v umovakh zminnogo tysku (na prykladi Volodymyr'skoi ploshchi Volyno-Podillia) / S. Vyzhva, I. Bezrodna. // Materialy XIth International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects. [in Ukrainian].
- Gimatudinov, Sh. K. (1971). Fizika nefianogo i gazovogo plasta. Uchebnik. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Nedra, 312 p. [in Russian].
- Grigorev, B.V., Shubin, A.A. (2015). Vliianie izmeneniia effektivnogo davleniia na filtratsionno-emochnnye svoystva porod-kollektorov. Vestnik Tiimenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft, gaz, energetika, 1, 2(2), 15-21. [in Russian].
- Dortman, N.B. (1984). Fizicheskie svoystva gornykh porod i poleznykh iskopaemykh (petrofizika). Spravochnik geofizika. Pod red. N. B. Dortman. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Nedra, 455 p. [in Russian].
- Vyzhva, S.A., Prodaivoda, G.T., Bezrodna, I.M. et al. (2011). Kompleksni heoloho-petrofizychni doslidzheniia skladnopobudovanykh porid-kolektoriv skhidnogo skhyly Lvivskoho paleozoiskoho prohynu. Zvit z NDR. Kyiv, 594 p. [in Ukrainian].
- Marmorstein, L.M. (1962). Vliianie gornogo davleniia na elektricheskoe soprotivlenie i koeffitsient porystosti gornakh porod (na primere Chaidakhs'kogo razvedochnogo uchastka Nordvikskogo raiona). Avtoref. diss. ... kand.geol.-mineral. nauk. Moskva. [in Russian].
- Orlov, L.I., Toporkov, V.G., Zhuk, E.F., Konkova, L.V. (1981). Vliianie termobaricheskikh uslovii na zavisimosti mezhdu intervalnym

vremenem, elektricheskim soprotivleniem i poristostiu porod nizhnemelovykh otlozhenii Dautletabad-Donmezskogo mestorozhdeniia. Geologija nefii i gaza, 08. [in Russian].

15. Ali, H.S., Al-Marhoun, M.A., Abu-Khamsin, S.A., Celik, M.S. (1987). The effect of overburden pressure on relative permeability. SPE 15730, 335-340.

16. Birch, F. (1960). The Velocity of Compressional Waves in Rocks to 10 Kilobars, Part 1. Journal of Geophysical research, 65(4), 1083-1102. <http://dx.doi.org/10.1029/JZ065i004p01083>.

17. Gueguen, Y., Adelinet, M. et al. (2011). How cracks modify permeability and introduce velocity dispersion: Examples of glass and basalt. The Leading Edge, 30(12), 1392-1398. <http://dx.doi.org/10.1190/1.3672484>.

18. McLatchie, S., Hemstock, R.A., Young, J.W. (1958). The Effective Compressibility of Reservoir Rock and Its Effects on Permeability. Journal of petroleum technology, 10(6), 49-51.

19. Pros, Z., Lokajicek, T., Klima, K. (1998). Laboratory Approach to the Study of Elastic Anisotropy on Rock Samples. Pure and Applied Geophysics, Birkhauser Verlag, 151, 619-629.

20. Schon, J.H. (2011). Handbook of Petroleum Exploration and Production. Physical Properties of Rocks. A Workbook. Elsevier, 481 p. ISBN: 9780444537966.

21. Simmons, G. (1964). Velocity of Shear Waves in Rocks to 10 Kilobars, 1. Journal of Geophysical Research, 69(6), 1123-1130. <http://dx.doi.org/10.1029/JZ069i006p01123>.

22. Todd, T., Simmons, G. (1972). Effect of Pore Pressure on the Velocity of Compressional Waves in Low-Porosity Rocks. Journal of geophysical research, 77(20), 3731-3743. <http://dx.doi.org/10.1029/JB077i020p03731>.

23. Yu, G., Vozoff, K., Durney, D. W. (1991). Effects of Confining Pressure and Water Saturation on Ultrasonic Compressional Wave Velocities in Coals. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 28(6), 515-522. [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(91\)91127-D](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(91)91127-D).

Надійшла до редколегії 14.12.16

S. Vyzhva, Dr. Sci. (Geol), prof., Head of the Department of Geophysics, A. Shynkarenko, Ph.D student
E-mail: anastasiia.nesterenko@gmail.com,

I. Bezrodna, Cand. Sci.(Geol), Assotiate director of Institute of Geology Taras Shevchenko National University of Kyiv
Institute of Geology, 90 Vasylyvska Str., Kyiv 03022, Ukraine,

I. Shchurov, PhD, Chief Executive Officer,

I. Gafyith, Cand. Sci.(Geol.-min), director of exploration and perspective development,

I. Solodkyi, Cand. Sci.(Geol), manager of reservoirs modeling department LLC "DTEK Naftogaz", 57 Lva Tolstogo Str., Kyiv 01032, Ukraine

INFLUENCE OF VARIABLE PRESSURE ON ACOUSTIC AND VOLUMETRIC PROPERTIES OF TERRIGENOUS RESERVOIR ROCKS (ON THE EXAMPLE OF SEMYRENKIVSKA AREA SAMPLES)

Analysis and interpretation of investigations of the rock samples from the producing horizons of Semyrenkivska area of Dnieper-Donets Basin under high pressure were carried out.

The purpose of this paper is to determine peculiarities of acoustic and volumetric properties of Lower Carboniferous terrigenous rocks changes under high pressure and qualitative evaluation of their void space structure changes during compression and relaxation.

Set of samples is presented by Lower Carboniferous sandstones. Petrophysical investigations were carried out at the petrophysical laboratory of Institute of Geology of Taras Shevchenko National university of Kyiv.

Research technique includes the measurement of compressional wave velocity and open porosity value of the samples saturated with the reservoir fluid model under the influence of increasing hydrostatic pressure (from 0 up to 60 MPa) and decreasing pressure (from 60 to 0 MPa).

Compressional waves' velocities were found to be more sensitive to pressure variations than the open porosity value. The highest changes in these parameters were obtained for the pressure range from 0 to 10-15 MPa. The peculiarities of the void space structure of rocks were qualitatively determined and the groups of samples with similar distribution of the porosity types were separated using the data of the conducted investigations.

Qualitative prediction of reservoir properties changes for the horizons B-17, B-18 and B-19 of Semyrenkivska area in case of hydrocarbons extraction or their variable depth based on the analysis of elastic waves and open porosity values changes under the influence of high pressure can be made.

Results of the conducted investigations will be used for the acoustic data inversion into the parameters of void space structure and quantitative evaluation of distribution of different pore types in the samples.

Key words: petrophysics, reservoir rock, void space structure, high-pressure unit, compressional wave velocity, open porosity.

C. Выхва, д-р геол. наук, проф., зав. кафедри геофізики,

A. Шинкаренко, асп.

E-mail: anastasiia.nesterenko@gmail.com,

И. Безродная, канд. геол. наук, с.н.с., зам. директора Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, УНИ "Институт геологии"
ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина,

И. Щуров, канд. техн. наук, генеральный директор,

И. Гафич, канд. геол.-мин. наук, директор по разведке и перспективному развитию,

Е. Солодкий, канд. геол. наук, менеджер отдела по моделированию месторождений ООО "ДТЭК НЕФТЕГАЗ", ул. Льва Толстого, 57, г. Киев, 01032, Украина

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ДАВЛЕНИЯ НА АКУСТИЧЕСКИЕ И ЕМКОСТНЫЕ СВОЙСТВА ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ (НА ПРИМЕРЕ ОБРАЗЦОВ СЕМИРЕНЬКОВСКОЙ ПЛОЩАДИ)

Проведен анализ и интерпретация результатов исследования керн в условиях высоких давлений из продуктивных горизонтов скважин Семиреньковской площади Днепровско-Донецкой впадины.

Целью данной работы является определение особенностей изменения акустических и емкостных свойств нижнекаменноугольных терригенных пород в условиях высоких давлений и качественная оценка изменения структуры их пустотного пространства в условиях сжатия и релаксации.

Коллекция образцов представлена нижнекаменноугольными песчаниками. Комплекс петрофизических работ проводился в петрофизической лаборатории УНИ "Институт геологии" Киевского национального университета имени Тараса Шевченко.

Методика исследований: проводились измерения скоростей продольной волны и коэффициента открытой пористости образцов после их насыщения моделью пластовой жидкости с увеличением гидростатического давления от 0,1 до 60 МПа и его снижением от 60 до 0,1 МПа.

Определено, что скорости упругих волн являются более чувствительными к изменениям давления, чем коэффициент пористости. Максимальные изменения этих параметров наблюдались при возрастании давления от 0,1 до 10-15 МПа. На основе полученных данных были качественно определены особенности структуры пустотного пространства горных пород и выделены группы образцов с подобными распределениями типов пористости.

На основании анализа поведения скоростей упругих волн и коэффициента пористости, в условиях моделирующих пластовые, для горизонтов В-17, В-18 и В-19 Семиреньковской площади можно качественно прогнозировать изменение их коллекторских свойств в процессе извлечения углеводородов и в случае изменения глубины их залегания по площади.

Результаты проведенных исследований будут использованы для инверсии данных акустических исследований в параметры структуры пустотного пространства и для количественной оценки распределения разных типов пустот в образцах.

Ключевые слова: петрофизика, порода-коллектор, структура пустотного пространства, установка высоких давлений, скорость продольных волн, коэффициент открытой пористости.