

**Ігор КУРОВЕЦЬ, Олександр ЗУБКО, Ігор ГРИЦИК,
Олександр ПРИХОДЬКО, Роман-Даниїл КУЧЕР**

Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України, Львів, Україна,
e-mail: iggk@mail.lviv.ua

АПАРАТУРНО-МЕТОДИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДОСЛІДЖЕНЬ ПЕТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРІЩИНУВАТИХ ПОРІД-КОЛЕКТОРІВ ВУГЛЕВОДНІВ

Розроблено апаратурно-методичний комплекс лабораторних досліджень тріщинуватих порід-колекторів вуглеводнів. На основі вивчення мінливості акустичних властивостей у різноорієнтованих напрямках вимірів на необроблених кусках керна розроблено апаратуру для експресної діагностики внутрішньої будови породи. Результати аналізу анізотропії акустичних властивостей керна дають змогу відібрати зразки з аномальними властивостями, на яких проводять подальші дослідження для встановлення факторів неоднорідності породи. Вимірювання швидкості поширення поздовжніх та поперечних коливань із записом їхніх хвильових картин проводять в акустичній ванні. Акустична система обладнана відповідним адаптером для підключення до комп'ютера, що дає змогу вести цифровий запис усіх параметрів вимірювань. Для оцінки проникності мікротріщин та впливу на них складнапруженого стану розроблено пристрій для досліджень радіальної фільтрації, за результатами яких оцінюється проникність породи внаслідок зміни структури та розмірів мікротріщин залежно від величини та характеру напруженого стану. Для вимірювання деформаційно-міцнісних параметрів розроблено і виготовлено відповідну установку, додатково обладнану лічильником для заміру деформації, що дозволяє вимірювати значення контактної твердості, модуль пружності та границю міцності породи при одновісному навантаженні. Параметри визначають у довільно вибраних точках на зрізах керна, а швидкість навантаження напівавтоматично регулюється в широких межах. Установка обладнана електронним контролером, що дає змогу не тільки вимірювати величину контактної твердості, але й у реальному часі вести спостереження на дисплеї за зміною деформації від величини навантаження та заносити параметри досліджень у відповідну базу даних. Отримані характеристики порід є не тільки параметричною основою для інтерпретації матеріалів ГДС, але й для оцінки зміни об'єму, типу порового простору та проникності, а також для моделювання умов утворення тріщинного колектора і загалом для прогнозування зон (ділянок), де щільна порода з відповідними механічними параметрами могла б набути властивостей колектора. Застосування комплексу досліджень тріщинуватості в нафтовій геології дає змогу розширити прогноз і відкриття нових родовищ вуглеводнів та покращити видобувні й експлуатаційні можливості вже діючих.

Ключові слова: апаратурно-методичний комплекс, тріщинуваті породи-колектори, акустичні хвилі, деформаційно-міцнісні параметри, радіальна фільтрація.

Вступ. Перспективи відкриття нових родовищ вуглеводнів та дорозвідки і розробки вже наявних в Україні пов'язують зокрема і зі складнобудованими порово-тріщинними колекторами (Крупський та ін., 2014; Павлюк та ін., 2022). Тріщинуваті породи і колектори відрізняються від пористих нерівномірним розподілом у просторі, що пов'язано з неоднорідністю і анізотропністю фізико-механічних властивостей та варіацією напружень в структурі, а їхні ємнісно-фільтраційні властивості контролюються двома чинниками різної природи – літолого-фаціальним та структурно-деформаційним (Куровець та ін., 2023).

Інформацію про петрофізичні властивості порід-колекторів отримують в основному за допомогою геофізичних методів дослідження свердловин (ГДС), основою інтерпретації яких є залежності фізичних параметрів відповідного поля (наведеного чи природного) від структури пустотного простору та складу каркаса відповідних гірських порід. Наявні методи дають можливість кількісної оцінки параметрів тріщинуватості, однак аналітичні залежності між ними і геофізичними полями базуються на вкрай ідеалізованих моделях досліджуваного об'єкта, що і зумовлює значні похибки інтерпретації. Більш точних та об'єктивних результатів цих методів можна досягти, застосувавши емпіричні залежності, отримані при виконанні лабораторних досліджень керна нового матеріалу. Найінформативнішою ознакою наявності тріщин є ефект зміни параметрів поширення акустичних хвиль. Перевагою акустичних параметрів є те, що їхні значення контролюються механічними властивостями породи і дуже точно реагують на величину зміни її щільності (густини). На характер поширення поздовжніх і поперечних хвиль також впливає орієнтація тріщин і за відповідних умов втрати енергії при поширенні хвиль можуть досягти значного рівня. Отже, параметр співвідношення амплітуд поздовжніх і поперечних хвиль несе важливу інформацію про орієнтацію тріщини.

Сьогодні в Україні не виготовляють апаратури для лабораторних досліджень ємнісно-фільтраційних та фізико-механічних параметрів складнобудованих порід-колекторів, що зумовило необхідність проєктування та виготовлення дослідних зразків апаратури для вирішення проблеми створення параметричної основи для кількісної інтерпретації даних ГДС при вивченні тріщинуватих та порово-тріщинуватих колекторів. При розробці цього апаратурно-методичного комплексу були використані досвід та розробки, отримані у відділі проблем нафтової геофізики Інституту геології і геохімії горючих копалин НАН України при лабораторних дослідженнях петрофізичних властивостей гранулярних порід-колекторів (Зубко, 1989; Зубко & Шеремета, 1988; Куровець та ін., 2007).

Мета досліджень – розробити апаратуру та методику лабораторних досліджень складнобудованих порід-колекторів для визначення таких параметрів: акустичних – швидкості поздовжніх і поперечних хвиль та їх затухання; деформаційно-міцнісних – статичну та динамічну міцність, коефіцієнти стиску породи, порового простору, скелету породи; дослідження радіальної фільтрації в умовах складнонапруженого стану.

Результати досліджень та їхнє обговорення. Методика лабораторних досліджень керна включає повний комплекс методів вивчення властивостей матриці породи, діагностики й оцінки фізико-механічних параметрів колектора

в цілому, незалежно від попередніх висновків про вид та характер порового простору цих відкладів.

Першим кроком у таких дослідженнях є візуальне обстеження керна, унаслідок чого фіксуються наявні тріщини, стиліти та інші включення і неоднорідності породи, їхні розміри й орієнтація. Ці обстеження фіксують у вигляді таблиць, обробку яких проводять статистичними та геометричними методами. Аналіз результатів дає змогу окреслити шляхи подальших досліджень (кількість зрізів, шліфів, аншліфів та форм керна).

Експресну діагностику внутрішньої будови породи проводять на основі вивчення мінливості акустичних властивостей у довільно орієнтованих напрямках вимірів на необроблених зразках керна. Для цього розроблено і виготовлено портативну установку (рис. 1), у якій застосовано акустичні датчики точкового типу, що збуджують і приймають об'ємну хвилю. Поверхня контакту не впливає на хвильову картину та величину часу проходження пружної хвилі через kern, оскільки площа контакту мала, а його надійність забезпечується відповідним навантаженням на датчики, яке плавно змінюється в межах 5–200 кг. Орієнтація керна щодо поверхні нашарування контролюється величиною кута повороту та віддаллю між контактами датчиків, що дозволяє фіксувати напрямки з аномальними властивостями, які є ознакою наявності в ньому мікротріщин чи зміни складу. Результати аналізу анізотропії акустичних властивостей керна дають змогу виокремити зразки з аномальними властивостями, на яких проводять подальші дослідження для встановлення чинників неоднорідності породи. Для цього з керна вирізають зразки кубічної форми, сліди тріщин на площинах зрізів шліфують, втирають контрастний барвник та за допомогою цифрової камери або сканера зображення площини вводять у комп'ютер, де реєструють та обробляють зображення. Такі самі дослідження проводять і для площин з характерними змінами мінералогічного складу чи викопними організмами.

На кубиках керна роблять заміри швидкості поширення поздовжніх та поперечних коливань із записом їхніх хвильових картин. Вимірювання

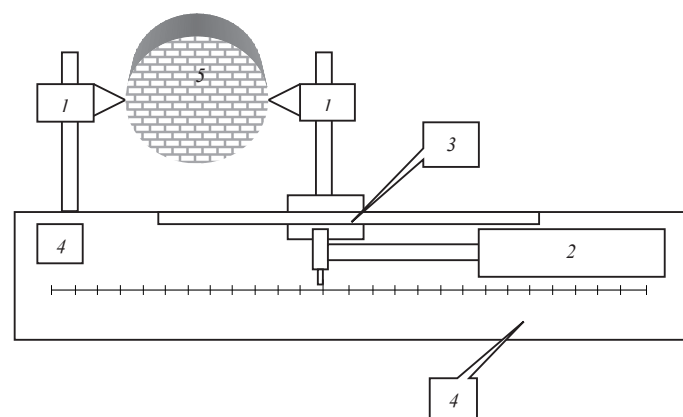


Рис. 1. Схема пристрою для експресних акустичних досліджень зразків керна:
1 – акустичні давачі; 2 – привід для переміщення давача та створення заданого навантаження;
3 – направляюча з повзуном; 4 – несуча рама; 5 – зразок керна

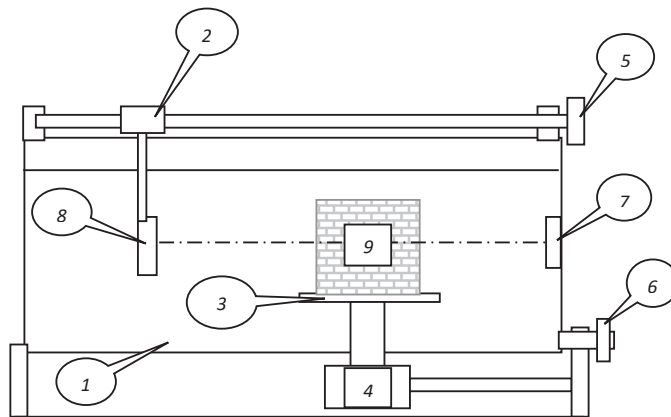


Рис. 2. Схема пристрою для вимірювання акустичних параметрів зразків керна: 1 – ванна з відповідним флюїдом; 2 – система переміщення акустичного давача; 3 – предметний столик; 4 – система повороту столика на відповідний кут; 5 – мікрометричний гвинт для визначення віддалі між давачами; 6 – мікрометричний гвинт визначення кута повороту предметного столика; 7 – нерухомий акустичний давач; 8 – рухомий акустичний давач; 9 – зразок керна

відбувається в акустичній ванні (рис. 2), у центрі якої розміщений поворотний предметний столик, на якому закріплюють досліджуваний зразок так, щоб вісь акустичних датчиків проходила через його центр. Змінюючи кут між акустичною віссю і площиною зразка поворотом столика, отримуємо відповідні хвильові картини як для P - і S -хвиль окремо за критичних кутів, так і їхню суперпозицію. Ванну заповнюють відповідно вибраним флюїдом (вода, масло, нафта, глинистий розчин та ін.). Акустична система обладнана відповідним адаптером для підключення до комп'ютера, що дає змогу цифрового запису всіх параметрів вимірювань. Таким чином можемо вивчати вплив складу каркаса, орієнтації та величин інтенсивності та розкриття тріщин на акустичні параметри. Змінюючи віддаль між датчиками і зразком, досліджуємо вплив розміру та властивостей пласта відповідного флюїду на параметри хвильової картини. Їхній аналіз дозволить забезпечити інтерпретацію ширококутового акустичного каротажу відповідними параметрами для однозначного виокремлення та кількісної оцінки тріщинуватого колектора даного розрізу, оскільки станом на зараз є кращим методом, який базується на механічних властивостях середовища і є менш чутливим до аномалій стовбура свердловини, ніж інші методи.

Для вимірювання деформаційно-міцнісних параметрів розроблено і виготовлено відповідну установку (рис. 3), додатково обладнану лічильником заміру деформації, що дає змогу вимірювати величину контактної твердості, модуль пружності та границю міцності породи при одновісному навантаженні. Параметри визначають у довільно вибраних точках на зрізах керна. Швидкість навантаження півавтоматично регулюється в широких межах. Установка обладнана електронним контролером, що дозволяє не тільки вимірювати величину контактної твердості, але й вести спостереження на дисплеї за зміною деформації від величини навантаження в реальному часі та заносити параметри досліджень у відповідну базу даних.

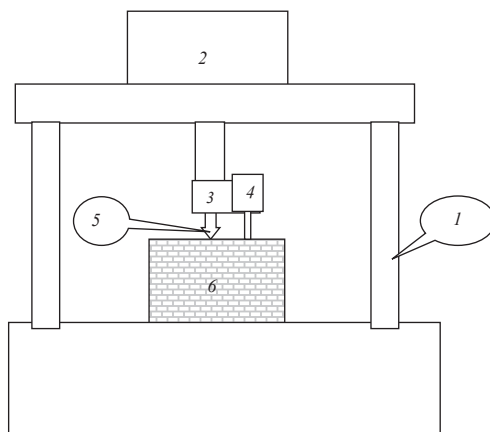


Рис. 3. Схема пристрою для дослідження міцності та пластичності порід:
 1 – несуча рама; 2 – циліндр створення навантаження на поверхню зразка; 3 – пристрій для кріплення побідового пуансона (5) відповідного розміру; 4 – система вимірювання глибини лунки відповідно до величини навантаження; 6 – зразок керна

Під час інтерпретації акустичного каротажу отримують динамічні параметри міцності, які значно перевищують статичні, що викликає труднощі в оцінці зв'язку умов тріщиноутворення з механічними властивостями порід-колекторів та типом напруженого стану. Для оцінки такого зв'язку пропонується брати контактну міцність, величина якої більша, ніж границя міцності при одновісному навантаженні, але відповідає міцності при складному всебічному стиску. Статистична обробка результатів обох методів дозволяє виконати ці завдання через отримані емпіричні залежності.

Міцність породи контролює опір руйнування при дії бурового інструмента і визначає швидкість буріння. Поточний контроль швидкості буріння дає змогу фіксувати тріщинуваті зони ще на стадії буріння, що дозволяє оптимізувати технологію проходження таких зон і сформувавши відповідний комплекс методів ГДС для оцінки параметрів цієї зони, а також розробити відповідну методику освоєння та дослідження при завершенні свердловини.

Визначення статичних параметрів міцності ми проводимо через оцінку контактної твердості, що є простішим варіантом методики Л. А. Шрейнера. Цей метод ґрунтується на втисканні циліндричного штампу з плоскою основою діаметром 1,5–3,0 мм у нешліфовану поверхню зразка. Контактну міцність у точці визначають за величиною навантаження в момент крихкого руйнування (появи тріщин і лунки під штампом), яка належить до площі штампу (її розмірність – кгс/мм). Метод простий і розрахований на отримання масової інформації, яку використовують для визначення коефіцієнта пластичності та ступеня неоднорідності породи, а на основі математичної обробки цих результатів отримуємо параметри міцності кожного керна (пласта, горизонту).

Неоднорідність породи оцінюємо за величиною дисперсії показників міцності структурних елементів породи (зерно, включення тощо), при цьому розміри штампів і вибраної структурної одиниці повинні бути співрозмірними. Чим вища дисперсія, тим більш неоднорідна порода. Величина неоднорідності характеризує вид та об'єм руйнування породи при навантаженні. У неодно-

рідному зразку перед основним розривом виникає багато мікротріщин, в однорідному – перед розривом вони утворюються у вузькій зоні в околі основного розриву, у дуже неоднорідному – проходить утворення мікротріщин майже в усьому об'ємі зразка без утворення помітного розриву.

Деформаційні властивості порід характеризують не тільки зміну твердого скелета, але й величину та структуру порового простору. Залежно від величини навантаження кількісно деформації можуть бути оцінені за допомогою коефіцієнтів стисливості. Згідно з дослідженнями для визначення об'ємних деформацій пористого середовища достатньо знайти три такі величини: коефіцієнт стисливості скелета породи; коефіцієнт стисливості порового простору породи; коефіцієнт стисливості твердої фази породи.

Величину коефіцієнта стисливості порового простору колектора визначають шляхом обробки матеріалів досліджень зразків в умовах заданого напруженого стану, за відносною величиною зміни об'єму порового простору від тиску. Коефіцієнт стисливості пор не залежить від величини пористості, і в цьому його перевага порівняно з коефіцієнтом стисливості скелета, коли треба зіставляти пружні властивості колекторів з різною величиною пористості. Маючи величини пористості, коефіцієнтів стисливості пор та твердої фази, можемо розрахувати величину стисливості скелета й отримати повне уявлення про деформаційні властивості породи.

Оцінку проникності мікротріщин та впливу на них складнонапруженого стану проводимо методом радіальної фільтрації на розробленій установці (рис. 4) з використанням великих зразків циліндричної форми ($D = 40\text{--}100\text{ мм}$, $h = 1,0\text{--}1,5D$) з центральним отвором діаметром $10\text{--}12\text{ мм}$. Труднощі цих досліджень полягають у тому, що доводиться працювати з дуже малими (менш ніж $0,01\text{ см}^3/\text{год}$) витратами флюїду, збільшення його може викликати небажані зміни в зразку. У лабораторних замірах градієнт тиску змінюється в межах $1\text{--}1000$, а в природних умовах не перевищує 10 . Дослі-

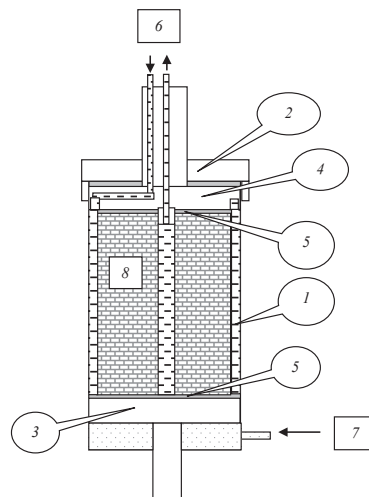


Рис. 4. Схема пристрою для досліджень радіальної фільтрації:

1 – корпус камери; 2 – накідна гайка; 3 – поршень осьового навантаження; 4 – поршень підводу фільтрувального флюїду; 5 – поліуретанові підкладки; 6 – система регулювання; 7 – система створення та регулювання одиниці навантаження на зразок, 8 – зразок керна

дження проводять з радіальним конвергентним і дивергентним потоками флюїду. У першому випадку тиск на твірній циліндра підтримується більшим, ніж в отворі зразка, натомість у другому – при цьому лінії потоку залишаються такими самими, тільки їхній напрямок змінюється на протилежний: напруження в породі пропорційні величині перепаду тиску і в першому випадку спричинені силами стиску, а в другому – силами розтягу.

Висновки. Проведені дослідження дали змогу спроектувати та виготовити дослідні зразки апаратури та розробити методику лабораторних досліджень тріщинуватих порід-колекторів. На основі отриманих на розробленому комплексі експериментальних даних створено параметричні моделі для інтерпретації матеріалів ГДС та результатів гідродинамічних досліджень свердловин. Це дасть можливість вивчати вплив складу каркаса, орієнтації і величини інтенсивності розкриття тріщин і вплив розміру та властивостей пласта відповідного флюїду на параметри хвильової картини, що забезпечить інтерпретацію широкосмугового акустичного каротажу відповідними параметрами для однозначного виокремлення та кількісної оцінки тріщинуватого колектора даного розрізу, оскільки на сьогодні є кращим методом, який базується на механічних властивостях середовища і менш чутливий до аномалій стовбура свердловини, ніж інші методи. Застосування комплексу досліджень тріщинуватості в нафтовій геології дасть змогу розширити прогноз і відкриття нових родовищ та покращити видобувні й експлуатаційні можливості діючих.

- Зубко, А. С. (1989). Некоторые особенности методики лабораторного определения водонасыщенности пород-коллекторов. В *Геофизическая диагностика нефтегазоносных и угленосных разрезов: сборник научных трудов АН УССР* (с. 103–113). Киев: Наукова думка.
- Зубко, А. С., & Шеремета, О. В. (1988). *Разработка универсальной установки высокого давления УВД-500 и методика изучения петрофизических свойств горных пород для условий, моделирующих пластовые* [Отчет]. Львов: Фонды ИГГГИ АН УССР.
- Крупський, Ю. З., Куровець, І. М., Сеньковський, Ю. М., Михайлов, В. А., Чепіль, П. М., Дригант, Д. М., Шлапінський, В. Є., Колтун, Ю. В., Чепіль, В. П., Куровець, С. С., & Бодлак, В. П. (2014). *Нетрадиційні джерела вуглеводнів України: Кн. 2. Західний нафтогазоносний регіон*. Київ: Ніка-Центр.
- Куровець, І., Зубко, О., Грицик, І., Приходько, О., & Кучер, Р.-Д. (2023). Особливості формування ємнісно-фільтраційних властивостей порід-колекторів Внутрішньої зони Передкарпатського прогину. У *Геофізика і геодинаміка: прогнозування та моніторинг геологічного середовища: збірник матеріалів IX Міжнародної наукової конференції (10–12 жовтня 2023 р.)* (с. 109–112). Львів.
- Куровець, І. М., Зубко, О. С., Кіт, Н. О., & Гвоздевич, О. В. (2007). *Пристрій для визначення проникності зразка гірської породи* (Деклараційний патент України № 80551). Бюлетень, 16.
- Павлюк, М., Наумко, І., Лазарук, Я., Хоха, Ю., Крупський, Ю., Савчак, О., Різун, Б., Медведєв, А., Шлапінський, В., Колодій, І., Любчак, О., Яковенко, М., Тернавський, М., Гривняк, Г., Тріска, Н., Сенів, О., & Гузарська, Л. (2022). *Резерв нафтогазовидобутку Західного регіону України* (Електрон. вид.). Львів. <http://iggcm.org.ua/wp-content/uploads/2015/10/РЕЗЕРВ-НАФТОГАЗОВИДОБУТКУ-ЗАХІДНОГО-РЕГІОНУ-УКРАЇНИ.pdf>

Стаття надійшла:
14.11.2023 р.

**Ihor KUROVETS, Oleksandr ZUBKO, Ihor HRYTSYK,
Oleksandr PRYKHODKO, Roman-Danyil KUCHER**

Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals
of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine,
e-mail: igggk@mail.lviv.ua

**APPARATUS-METHODICAL COMPLEX
OF THE STUDY OF PETROPHYSICAL PROPERTIES
OF FRACTURED RESERVOIR ROCKS OF HYDROCARBONS**

We have developed the apparatus-methodical complex of laboratory investigations of fractured reservoir rocks of hydrocarbons. Basing on the study of variability of acoustic properties in different-oriented directions for measuring of raw pieces of core, it was possible to develop the apparatus for the express-diagnostics of the inner structure of the rock. The results of analysis of anisotropy of acoustic properties of the core give us the possibility to choose the specimens with abnormal properties on which one can conduct further investigations for determination of the factors of heterogeneity of rocks. Measuring of the velocity of longitudinal and transverse oscillations with recording their wave pictures is conducting in the acoustic bath. The acoustic system is equipped with corresponding adapter for connection to the computer that enables us to keep up the recording of all parameters of measuring. To estimate the permeability of microfractures and the influence of composite taut state upon them we have developed the device for studying radial filtration the results of which allow us to estimate the rock permeability due to the change in the structure and microfractures size depending upon the value and the character of the taut state. To measure deformational-strength parameters the corresponding plant was developed and produced, which was additionally equipped with a meter for the measuring of deformation, that allows to measure the values of contact strength, elasticity module and the boundary of rock strength while one-axis charging. The parameters are determined at arbitrary points of the core cuts, and the velocity of charging is half-automatically regulated at a wide bounds. The device is equipped with the electron controller that allows us not only to measure the value of contact strength, but to conduct observations on a display as to the changes in deformation depending on the charging value in real time and to put down the parameters of investigations into corresponding data base. Obtained characteristic of rocks is not only parametric basis for interpretation of materials of charging, but for the estimation of the changes in volume, type of porous space and permeability, and also for modelling of formation conditions of fractured reservoir, and on the whole, for prediction of zones (plots) where a dense rock with corresponding mechanical parameters should acquire the properties of the collector. The usage of the complex for the studying of fracturing in oil geology allows us to widen the prognosis and discovery of new fields and to improve production and exploitation possibilities of already acting ones.

Keywords: apparatus-methodical complex, fractured reservoir rocks, acoustic waves, deformational-strength parameters.