

О.Л. ЗІМІН, І.Г. ЗЕЗЕКАЛО**МЕТОДИКА ТА ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕНЬ ФІЛЬТРАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
УЩІЛЬНЕНИХ ГЛИБОКОЗАЛЯГАЮЧИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД**

У результаті вичерпання традиційних запасів вуглеводнів постає необхідність розвідки покладів на великих глибинах та при складних геологічних умовах. Це передбачає удосконалення технологій вивчення гірських порід і флюїдів за допомогою систем комп'ютерного моделювання та лабораторного обладнання. Моделювання у лабораторних умовах процесів які відбуваються у гірських породах при бурінні, розробці, інтенсифікації чи різноманітних хімічних впливах відіграють значну роль при сучасному видобуванні вуглеводнів, оскільки дозволяє зменшити кількість помилок на стадії проектування розробки родовищ чи методів впливу на продуктивні пласти. В світі існує низка відомих виробників лабораторного обладнання, що моделюють фільтраційні процеси в гірських породах, проте будь яка система має як свої переваги так і недоліки. Для реалізації задач із вивчення фільтраційних процесів у гірських породах, технології розробки ущільнених та традиційних колекторів, методів інтенсифікації та фізико-хімічного впливу при видобуванні вуглеводнів розроблено фільтраційне обладнання, яке дозволяє проводити стандартні та спеціальні дослідження кернавого матеріалу гірських порід. Перша установка низького тиску дозволяє проводити швидкі та точні виміри пористості та проникності при тисках до 10 МПа та температурах до 120°C. Крім фільтраційних процесів обладнання дозволяє проводити оціночні дослідження впливу різноманітних хімічних розчинів, бурових та інших технологічних рідин на природні та штучні керни у наукових та промислових дослідженнях. Для досліджень гірських порід та флюїдів у пластових умовах розроблено фільтраційну систему, що дозволяє проводити всі вищевказані дослідження при тисках до 100 МПа та температурах до 200°C. Особливістю розробленого обладнання є висока точність вимірювань, автоматизація процесів моніторингу, корозійностійке виконання основних вузлів та агрегатів, що дозволяє проводити дослідження у будь якому агресивному середовищі. Лабораторні дослідження дозволяють уникати помилок при проектуванні розробки нових площ, зменшити аварійність буріння та підбирати ефективні технології впливу на гірські породи.

Ключові слова: ущільнені гірські породи; карбонати; інтенсифікація свердловин; кислотні розчини; фільтраційні процеси; фільтраційне обладнання.

O.L. ZIMIN, I.H. ZEZEKALO**METHODOLOGY AND FEATURES OF RESEARCH OF FILTRATION PROPERTIES OF
COMPACTED DEEP-SEATED ROCKS**

As a result of the depletion of conventional hydrocarbon reserves, there is a need to explore deposits at great depths and under difficult geological conditions. This requires the improvement of technologies for studying rocks and fluids using computer modeling systems and laboratory equipment. Laboratory modeling of the processes occurring in rocks during drilling, development, stimulation or various chemical treatments plays a significant role in modern hydrocarbon production, as it reduces the number of errors at the design stage of field development or methods of impacting productive formations. There are a number of well-known manufacturers of laboratory equipment that model filtration processes in rocks, but any system has both advantages and disadvantages. To implement the tasks of studying filtration processes in rocks, technologies for the development of compacted and conventional reservoirs, stimulation methods and physical and chemical effects in hydrocarbon production, filtration equipment has been developed that allows for standard and special studies of rock core material. The first low-pressure unit allows for fast and accurate measurements of porosity and permeability at pressures up to 10 MPa and temperatures up to 120°C. In addition to filtration processes, the equipment allows for evaluation studies of the impact of various chemical solutions, drilling and other process fluids on natural and artificial cores in scientific and industrial research. For the study of rocks and fluids in reservoir conditions, a filtration system has been developed that allows for all of the above studies at pressures up to 100 MPa and temperatures up to 200°C. The peculiarity of the developed equipment is high accuracy of measurements, automation of monitoring processes, corrosion-resistant design of the main components and assemblies, which allows conducting research in any aggressive environment. Laboratory studies allow avoiding mistakes in the design of new areas development, reducing drilling accidents and selecting effective technologies for rock impact.

Keywords: compacted rocks; carbonates; well stimulation; acid solutions; filtration processes; filtration equipment.

Вступ

Активне видобування традиційних запасів нафти і газу у світі призводить до необхідності бурити з кожним роком все глибші експлуатаційні свердловини. Дослідження великих глибин із значними пластовими тисками і температурами та низькими фільтраційно-емісійними характеристиками набувають все важливішого значення, але, разом з тим, вимагають зваженого науково-технічного підходу. Значні перспективи для збільшення видобувних запасів вуглеводнів відкриває можливість розробки ущільнених глибокозалягаючих гірських порід [1-3]. Розробка

таких порід як правило передбачає використання технологій інтенсифікації для збільшення фільтраційних властивостей привибійної зони чи зони дренажу свердловини вцілому [4]. Сучасні методи стимуляції роботи свердловин передбачають детальне вивчення впливу рідин інтенсифікації на породи в лабораторних умовах до початку проведення промислових заходів та випробувань.

Вивчення процесів буріння чи розробки передбачає аналіз впливу сучасних технологічних рідин на гірські породи ще до початку буріння (за умови наявності кернавого матеріалу), що вимагає

спеціалізованого лабораторного обладнання для досліджень фільтраційних властивостей в пластових умовах. Якісні дослідження дозволяють уникнути помилок на стадії проектування та спорудження свердловини, дозволяють оптимізувати кількість видобувних свердловин та їх сітку при розробці, підвищити ефективність буріння кожної конкретної свердловини [5].

Складність експлуатації, висока технологічність та наукоємність сучасних процесів розробки вимагають виважених підходів до упровадження новітніх технологій. Передусім це стосується обов'язкових процесів моделювання та лабораторних досліджень, що передують будь-яким промисловим випробуванням. Для якісних лабораторних досліджень гірських порід та флюїдів у світі широко використовується обладнання для моделювання пластових умов фільтрації, що дає змогу вивчати та моделювати процеси та особливості розробки чи інтенсифікації без втручання в реальні свердловини [6].

У 30-х роках минулого століття Хаслером та іншими вченими розроблено обладнання та методику дослідження фільтраційних властивостей гірських порід. Після цього, паралельно з розвитком нафтогазовидобутку, почався бурхливий розвиток лабораторного обладнання. У нашій країні тривалий час дослідження проводились на обладнанні радянських розробок 50-х років, типу УИПК-2 та аналогічних, які мають значні недоліки пов'язані із застарілістю конструкції. Точність вимірювань та достовірність (повторюваність) результатів при дослідженнях на такому обладнанні є дуже низькою, та пов'язана з якістю приладів фіксації тиску, температури, витрати, точністю подачі насосного та компресорного обладнання. Це не дає змоги у більшості випадків застосовувати результати цих випробувань. Багато підприємств та науково-дослідних установ проводили різні удосконалення, пов'язані із встановленням точних манометричних приладів чи витратомірів, удосконаленням конструкції кернотримача чи насосного обладнання, але це незначно покращувало якість вимірювань та досліджень в цілому.

Останні роки значно зростають можливості комп'ютерних технологій та лабораторних дослідних систем для моделювання пластових тисків та температур, процесів багатофазової стаціонарної та нестаціонарної фільтрації пластових флюїдів та технологічних рідин, інших процесів нафтогазовидобутку. Сучасні технології в цьому напрямі розробляються, наприклад, такими відомими компаніями як Core Laboratories, Vinci Technologies, DCI Test Systems та багатьма іншими. Таке високотехнологічне обладнання дозволяє значно підвищити ефективність досліджень при моделюванні та впровадженні нових технологій буріння, розробки, експлуатації, інтенсифікації тощо.

Якщо враховувати регіональний контекст, то в Україні в деякій мірі відчувається брак технологій для високоточних фільтраційних досліджень, оскільки сучасне обладнання має невелика кількість підприємств та наукових установ. В умовах поступового зростання глибин буріння, складності умов проектування свердловин та удосконалення технологій розробки постійно зростає попит на проведення високотехнологічних фільтраційних досліджень. Крім того, такі установки переважно вузькоспеціалізовані і для деяких унікальних дослідів зразки доводиться відправляти до інших країн, що значно збільшує час та вартість проведення робіт.

Усе це вимагає створення універсального сучасного високоточного обладнання, що дозволить швидко та без затримок проводити необхідні фільтраційні дослідження гірських порід з використанням будь-яких флюїдів.

Виклад основного матеріалу

В залежності від напрямку та специфіки досліджень, проведення аналізу порід чи флюїдів передбачає виконання певної послідовності завдань. Для вивчення, наприклад, фільтраційних процесів в ущільнених гірських породах та методів інтенсифікації при подальшій розробці таких колекторів [7] пропонується виконати наступні задачі:

1. Провести дослідження фізичних та механічних властивостей гірських порід.
2. Дослідити фільтраційні та ємнісні характеристики породи.
3. Провести аналіз причин зниження фільтраційних властивостей породи.
4. Підібрати можливі ефективні хімічні розчини для впливу на фільтраційні показники ущільнених порід-колекторів нафти і газу.
5. Провести дослідження впливу хімічних розчинів інтенсифікації на модельних зразках штучних кернів для забезпечення підбору найбільш ефективних композицій в однакових умовах.
6. Дослідити вплив розчинів інтенсифікації на фільтраційно-ємнісні властивості досліджуваних порід при високих температурах (до 120°C) на штучних та природних кернах.
7. Провести дослідження впливу розроблених розчинів на керни реальних гірських порід при пластових тисках та температурах.
8. Проаналізувати ефективність впливу розроблених технологій на фільтраційні властивості при різних геологічних умовах залягання порід.

Для реалізації поставлених задач було розроблено комплекс спеціалізованого лабораторного фільтраційного обладнання, що забезпечить проведення всього комплексу експериментів, виходячи із вище поставлених завдань.

Фільтраційна установка низького тиску (рис.1) для дослідження фільтраційно-ємнісних

характеристик гірських порід дозволяє проводити дослідження гірських порід на пористість і проникність шляхом прокачувати рідин та газів крізь стандартні зразки (циліндри) гірських порід розміром 30×30мм.

Крім стандартних досліджень фільтраційно-емнісних показників обладнання використовується для оцінки впливу на фільтраційно-емнісні

властивості гірських порід чи штучно сформованих зразків різноманітних технологічних рідин, бурових розчинів, рідин інтенсифікації чи глушіння при тисках до 10 МПа.

Установка складається з власне фільтраційної системи та блоку порозиметра.

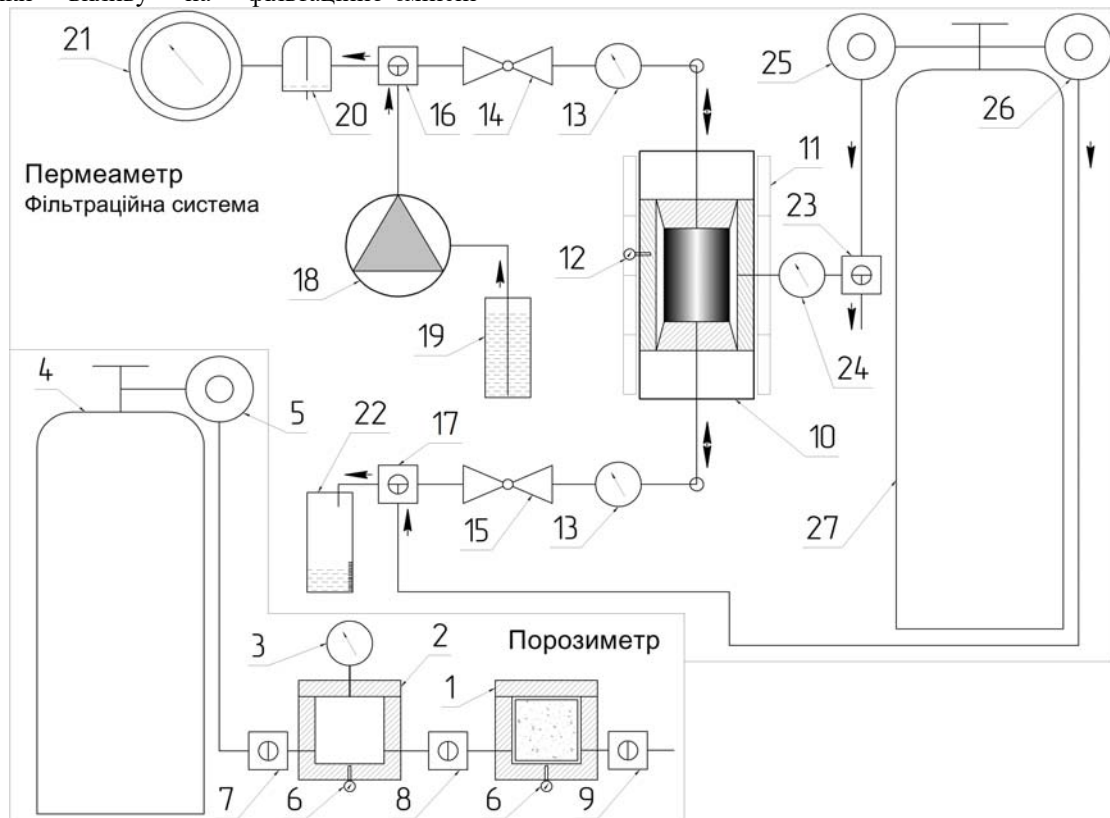


Рис.1 Схема фільтраційної установки низького тиску

Порозиметр призначений для визначення пористості газоволюметричним методом за допомогою гелію. Прилад складається з двох комірок однакового об'єму, у першу (1) завантажується дослідний зразок, друга являється еталонною (2) і обладнана високоточним датчиком тиску Siemens (3). Для роботи також необхідний балон з гелієм (4), газований редуктор (5) для створення необхідних тисків, датчики температури комірок (6) та шарові крани (7,8,9), що дозволяють керувати перепуском гелію між комірками, контролюючи при цьому тиск та температуру. Прилад дозволяє швидко вимірювати пористість у широких межах за різницею у падінні тиску для дослідних зразків та еталонів. Цей метод набагато швидший і не менш точний, від загальноживаного у нас способу визначення пористості методом насичення (або методом Преображенського).

Для фільтраційних досліджень при вимірюванні проникності визначають витрату азоту через поперечний перетин керна при різних перепадах тиску. Для цього у кернотримач (10)

завантажується зразок керну гірської породи чи штучного матеріалу і за допомогою редуктора (26) створюється необхідний тиск азоту із балону (27), який проходячи крізь триходовий кран (17) переключений у напрямі «газ», рухається через регулювальний вентиль (15) крізь кернотримач Хаслера зі зразком породи. Тиск на вході та виході контролюється за допомогою високоточних датчиків тиску (13), також тиски можна регулювати дроселюванням за допомогою вентилів (14 та 15). Далі газ потрапляє із кернотримача через триходовий кран (16), що також знаходиться в положенні «газ» до масового витратоміра Omega (21). Якщо газ може містити залишки рідини, перед витратоміром встановлюється сепаратор-розділювач (20).

Вимірювання проникності по рідині чи дослідження впливу технологічних рідин проходить аналогічно, але в протилежному напрямку. За допомогою дозуючого насоса (18) рідина забирається з ємності (19) та через триходовий кран (16) у положенні «рідина» рухається крізь регулювальний вентиль (14) на

вході, керн в кенотримачі (10) та регулювальний вентиль (15) на виході до мірної ємності (22), при цьому триходовий кран (17) також перемикається в положення «рідина». Бічний (гірський) тиск керну забезпечується азотом через окремий редуктор високого тиску (25) та триходовий кран (23), а контролюється датчиком (24). Для забезпечення регулювання температури використовується датчик-контролер (12) та термоізолюючий чохол, в середині якого знаходиться нагрівач (11), який дозволяє нагрівати кернотримач до температури у 120 °С.

Так, наприклад, у лабораторних дослідженнях розчинення карбонатних гірських порід за допомогою глибокопроникних повільнодіючих кислотних розчинів [8] на установці проводяться дослідження порід та штучних кернів на пористість і проникність. Для визначення основних робочих характеристик розчинів досліджується вплив на фільтраційні особливості одного з найважливіших параметрів – температури. В якості взірців використовуються зразки керну з крупнозернистого піщаника. Зразки для цих досліджень очищені від карбонатів і глинистої складової, для забезпечення відсутності хімічних реакцій при прокачуванні розчинів органічних кислот. Експерименти полягають у послідовному прокачуванні крізь зразки досліджуваних розчинів, органічних кислот та окремих розчинників при температурах від 25 до 120 °С.

Наступним етапом експериментів є дослідження процесів реакції досліджуваних хімічних розчинів на штучних кернах при тисках до 40 бар та пластових температурах. Формування штучних кернів відбувається із карбонатної крихти, бентонітової глини, піску та цементу. Зразки формуються під тиском у вигляді циліндрів висотою та діаметром 30 мм при додаванні води. У результаті всі штучні зразки мають однаковий склад та проникність, яка залежить від тиску формування та кількості води. Дослідження дають можливість дослідити вплив на проникність розчинів в залежності від швидкості реакції при різних температурах.

Аналіз численних лабораторних та промислових досліджень [9-12] показує, що для розробки нових технологій, що стосуються удосконалення розробки родовищ, інтенсифікації видобування за рахунок хімічних впливів чи гідравлічного розриву пласта необхідно проведення досліджень, що максимально моделюють пластові умови та всі процеси, які там відбуваються.

Отже, для досліджень при пластових тисках та температурах розроблено унікальну фільтраційну систему НРНТ, яка призначена головним чином для визначення фільтраційно-ємнісних властивостей порід та досліджень впливу на породи різних методів і процесів буріння, розробки, експлуатації чи інтенсифікації видобутку флюїдів у пластових умовах (рис.2).



Рис. 2 Фільтраційна установка високого тиску

Головним елементом системи є кернотримач Хаслера, до якого завантажуються стандартні зразки керну гірських порід. Вони поміщаються у силіконову манжету, що дозволяє створювати тиск обжиму (бічний тиск) до 110 МПа та нагрівати зразок до температури 200°C. Установка оснащена двома насосами для прокачування крізь зразки гірських порід різноманітних, в тому числі агресивних рідин. Насос високого тиску з гідравлічними розділювачами призначений для створення тисків до 100 МПа та прокачування крізь зразки рідин з високими подачами (до 400 мл/хв). Прецизійний насос M480 HPLC працює з тисками до 40 МПа, але має дуже високу точність регулювання подачі рідини, що дозволяє відслідковувати мінімальні перепади тиску при фільтрації до 10 мл/хв.

Для створення пластової температури використовуються нагрівальні елементи, якими кернотримач та лінії подачі рідин нагріваються до температури у 200°C., а для зменшення тепловтрат кернотримач ззовні закривають теплоізоляційним кожухом. Для досліджень процесів розробки покладів установка оснащена також горизонтальним кернотримачем зі змінною

довжиною циліндричного корпусу, що дозволяє досліджувати набірні зразки кернів діаметром у 30 мм та довжиною до 600 мм. Всі елементи системи мають кислотостійке виконання, що дозволяє досліджувати будь які агресивні рідини.

Важливим елементом обладнання є його автоматизація, що стосується в першу чергу збору та аналізу даних. Датчики тиску, витратомір, ваги та інше контрольне обладнання з'єднано у загальну SCADA-систему, для моніторингу, контролю, аналізу та архівування даних за допомогою комп'ютерних систем.

Досліди по визначенню основних фільтраційно-ємнісних характеристик гірських порід, дослідження процесів розробки, а також процеси обробки зразків породи рідиною інтенсифікації здійснюються у стаціонарному або нестаціонарному режимах фільтрації. Процес фільтрації рідини чи газу через пористе середовище кернового матеріалу може бути описаний за допомогою лінійного закону фільтрації Дарсі. Фільтрація флюїдів під дією перепаду тиску здійснюється в осьовому напрямку, тобто має місце прямолінійно-паралельна фільтрація.

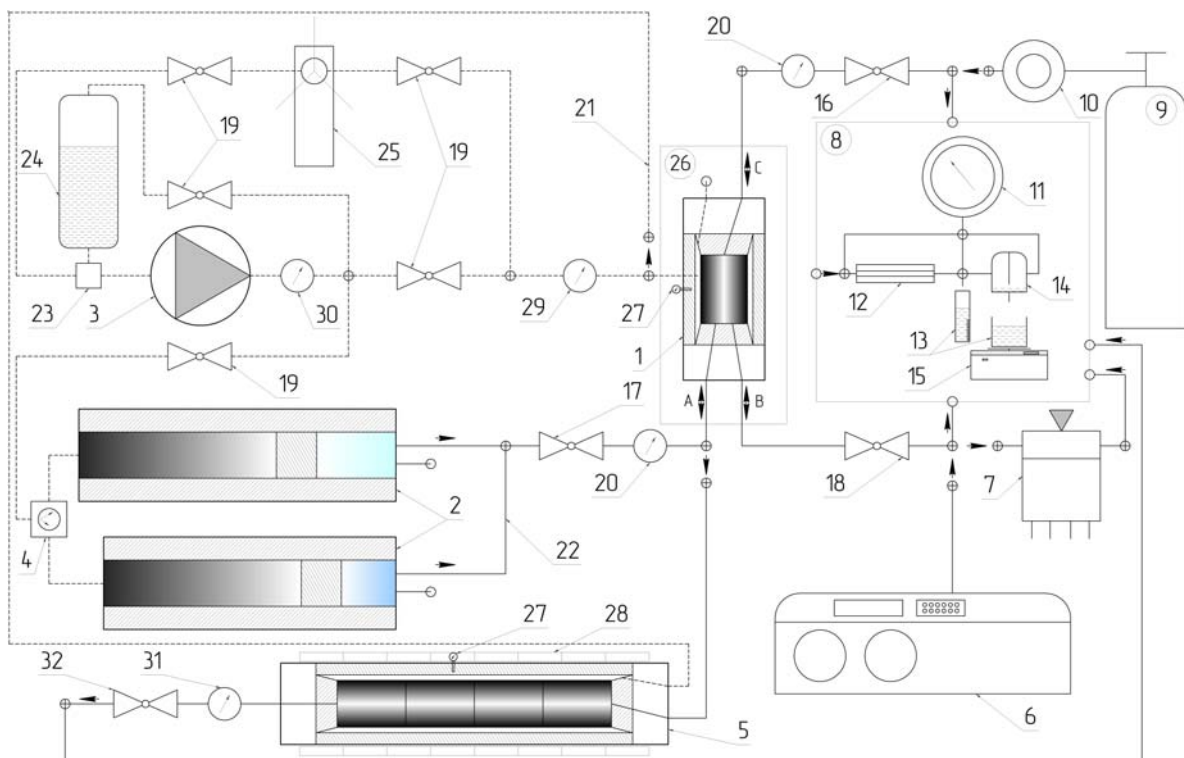


Рис. 3 Схема лабораторної системи високого тиску

До складу лабораторної установки високого тиску НРНТ (Рис. 3) для проведення фільтраційних досліджень входять: кернотримач Хаслера (1), що призначений для фіксації та всебічного рівномірного стискування зразка керну у силіконовій манжеті. Крізь керн під тиском фільтрується

рідина, що досліджується, яка нагнітається за допомогою преса-розділювача (2). Тиск у розділювачі створюється насосом високого тиску (3), який качає масло із ємності (24) через фільтр (23) до преса-розділювача (2), де витісняючий поршень виштовхує досліджувану рідину по

трубопроводам з робочою (досліджуваною) рідиною (22) до кернотримача (1 чи 5). За допомогою гідравлічного розділювача потоку (4) є можливість використання одночасно двох пресів розділювачів, які дають змогу нагнати дві різні технологічні рідини що не змішуються у різних пропорціях. Насос (3) має систему захисту, а також гідравлічну та електронну системи керування, що дозволяють керувати тиском та подачею масла у систему, та створювати цим необхідні пропорції подачі досліджуваних рідин до кернотримача. При дослідженні процесів розробки використовується горизонтальний кернотримач (5), який завдяки своїй конструкції дозволяє досліджувати набірні зразки стандартних кернів довжиною до 600 мм. Для точної подачі невеликих обсягів технологічних рідин з тиском до 40 МПа використовується насос M480 HPLC (6), який приєднується до другого входу у кернотримач (1). Також, для підтримання тиску з високою точністю на вході чи виході у кернотримач використовується регулятор протитиску (7) із пневматичною системою регулювання, що дозволяє встановлювати точні значення депресії тиску у зразках керну.

При імітації процесів буріння є можливість прокачувати крізь нижню торцеву площину керну технологічних рідин: бурових, спеціальних та ін. Для цього через вхід (А) за допомогою преса-розділювача (2) нагнітається рідина, а до входу (В) приєднується регулятор тиску (7), яким задається необхідний тиск на нижню площину керну. До виходу (С) приєднується або подача азоту, для імітації тиску із пласта, або замірна лінія (8) для вимірювання об'ємів фільтрату.

Для імітації роботи пласта, процесів освоєння або для визначення проникності через вхід (С) та крізь зразок керну прокачується, як правило, азот із балону (9) через редуктор (10) при тисках до 15 МПа. Якщо ж є необхідність дослідження низьких проникностей, створюється тиск азоту до 40 МПа, застосовуючи спеціальний компресор високого тиску із балоном об'ємом 1 л.

Вимірювальний блок (8) використовується для визначення об'єму та маси флюїду, що проходить крізь зразки керну, та може бути приєднаний як до верхнього чи нижнього виходу вертикального кернотримача, так і до виходу горизонтального кернотримача. В залежності від рідини чи газу, що проходять крізь досліджувані зразки та умови дослідження вимірювальний блок може складатися із високоточного масового витратоміра OMEGA (11), холодильника (12), мірного циліндру (13), сепараційного циліндру (14) та мірної ємності на електронних вагах (15). На входах та виходах кернотримачів встановлено регулювальні вентилі (16,17,18,32) та високоточні датчики тиску (20,31).

Для створення бічного (гірського) тиску у кернотримачах застосовується гідравлічна система, що складається із запірної арматури (19), преса

(25), напірних масляних трубопроводів гідравлічної системи (21). Тиски у гідравлічній системі контролюються датчиками-контролерами (29,30). За допомогою преса або насоса високого тиску можливо створити тиск обжиму до 110 МПа.

Для нагрівання та підтримки заданої температури вертикальний кернотримач має термостатуючий нагрівальний кожух (26), який дозволяє нагрівати кернотримач та лінії нагнітання до температури 200 °С, контроль та регулювання температури відбувається за допомогою датчиків (27). Горизонтальний кернотримач для підтримання температури до 120 °С також обладнаний спеціальним термоізоляційним чохлам (28) із нагрівальними елементами.

За допомогою описаного лабораторного обладнання проводиться найбільш важлива складова досліджень гірських порід, пластових флюїдів та технологічних рідин – від підбору розчинів для хімічних обробок гірських порід до аналізу процесів буріння чи ефективності застосовуваних технологій розробки родовищ.

Висновки

Дослідження наближені до пластових умов на зразках штучно створених гірських порід чи кернового матеріалу з реальних родовищ вуглеводнів дозволяють моделювати поведінку пластової системи у цих покладах та родовищах. Для вивчення процесів буріння, глушіння та освоєння свердловин, технологій розробки, ефективності методів інтенсифікації в умовах, наближених до реальних було створено лабораторне обладнання, що задовольняє вимогам проведення особливостей таких досліджень.

Лабораторна установка низького тиску дозволяє швидко та з високою точністю (клас точності датчиків тиску Siemens – 0,1) проводити дослідження на пористість та проникність, фільтрацію різних рідин крізь зразки при температурах до 120 °С. Завдяки використанню при дослідах лише стиснутого повітря чи азоту швидкість зміни зразків зростає у декілька разів у порівнянні з обладнанням де в якості робочої рідини застосовується технічна рідина.

Лабораторна система високого тиску для вивчення фільтраційно-ємнісних характеристик та процесів фільтрації є унікальним та, головне, універсальним обладнанням, що дозволяє виконувати широкий спектр досліджень. Установка має кислотостійке виконання усіх основних вузлів, що дозволяє вивчати будь які агресивні середовища. Автоматизація обладнання виконана на сучасному високому рівні, датчики тиску та витрати мають високі класи точності (0,1-0,25) для сучасного лабораторного обладнання, а SCADA-система дозволяє проводити процеси моніторингу, контролю, аналізу та архівування даних при виконанні досліджень. Використання двох кернотримачів дозволяє вивчати різноманітні процеси пов'язані з геологічним вивченням,

бурінням, хімічним впливом, розробкою та експлуатацією родовищ вуглеводнів. Вертикальний кернотримач має можливість крім звичайної фільтрації крізь зразок, досліджувати фільтрацію вздовж нижньої площини зразка з моніторингом тиску на іншому кінці керну, що є необхідним для дослідження процесів буріння. Для дослідження процесів заводнення при розробці або інших методів EOR/IOR використовується горизонтальний кернотримач із можливістю нарощування зразків кернів до 600 мм.

Створені дослідні системи вирізняються своєю універсальністю, адже завдяки обладнанню є можливість вивчати фільтраційні процеси, ефективність методів первинного та вторинного розкриття пластів, глушіння, інтенсифікації та підтримки пластового тиску, межі кондиційності покладів вуглеводнів, процеси розробки та експлуатації покладів нафти і газу.

Детальні лабораторні дослідження фільтраційних властивостей дозволяють уникати помилок при проектуванні свердловин, зменшити аварійність буріння, правильно підбирати розчини для первинного і вторинного розкриття пласта та бурити свердловини найбільш безпечними для колекторських властивостей способами, особливо на нових маловивчених площах. Вивчення ущільнених порід на предмет їх видобувних можливостей та способів інтенсифікації дає змогу ефективно розробляти поклади мінімальною кількістю свердловин та найбільш раціональними технологіями експлуатації, що дасть значний економічний ефект, враховуючи високу вартість спорудження глибоких видобувних свердловин.

Список літератури

1. Куровець І. М., Михайлов В. А., Зейкан О. Ю. та ін. (2014) *Нетрадиційні джерела вуглеводнів України: монографія у 8 книгах. Кн. I. Нетрадиційні джерела вуглеводнів: огляд проблеми* Київ: Ніка-центр, 208 с.
2. Вакарчук С. Г., Довжок Т. Є., Філюшкін К. К. та ін. (2014) *Перспективи освоєння ресурсів газу ущільнених порід у Східному нафтогазоносному регіоні України Кн. VI.* Київ: ТОВ «ВТС ПРИНТ», 208 с.
3. Вакарчук С.Г. Ресурсний потенціал нетрадиційних вуглеводнів ущільнених карбонатних порід турнейського ярусу ДДЗ // *Нафтогазова галузь України.* – 2015. – №5 – С. 46-49
4. Kristian Mogensen, Shehadeh Masalmeh, (2020) A review of EOR techniques for carbonate reservoirs in challenging geological settings, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 195, 107889, ISSN 0920-4105, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107889>
5. О.Л. Зімін, І.Г. Зезекало, Г.М. Бондар М.І. Євдошчук (2019) Перспективи розробки ущільнених карбонатних колекторів у межах Дніпровсько-Донецької западини *Нафтогазова галузь України, НАК Нафтогаз України* №2 14-18.
6. Huysang Yoo, Youngmin Kim, Wonsuk Lee, Jeonghwan Lee, An experimental study on acid-rock reaction kinetics using dolomite in carbonate acidizing, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 168, 2018, Pages 478-494, ISSN 0920-4105, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.05.041>.
7. Tan Peng, Jin Yan, Hou Bing, Zhou Yingcao, Zhang Ruxin, Chang Zhi, Fan Meng, Laboratory investigation of shale rock to identify fracture propagation in vertical direction to bedding,

Journal of Geophysics and Engineering, Volume 15, Issue 3, June 2018, Pages 696–706, <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aaa5d6>

8. Зімін О.Л. Удосконалення кислотних розчинів для інтенсифікації ущільнених високотемпературних карбонатних колекторів. *Технологічний аудит та резерви виробництва* - № 6/2021.
9. Ali, M. T.; Nasr-El-Din, H. A. (2020) New Insights into Carbonate Matrix Acidizing Treatments: A Mathematical and Experimental Study *SPE JOURNAL* Volume: 25 Issue: 3 P: 1272-1284.
10. Esteves Ferreira, M., Rodrigues Del Grande, M., Neumann Barros Ferreira, R. et al. Full scale, microscopically resolved tomographies of sandstone and carbonate rocks augmented by experimental porosity and permeability values. *Sci Data* 10, 368 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02259-z>
11. Z. Q. Fan, Z.-H. Jin, S. E. Johnson, Modelling petroleum migration through microcrack propagation in transversely isotropic source rocks, *Geophysical Journal International*, Volume 190, Issue 1, August 2012, Pages 179–187, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05516.x>
12. Ruspini, L. C., Øren, P. E., Berg, S., Masalmeh, S., Bultreys, T., Taberner, C., ... & Wilson, O. B. (2021). Multiscale digital rock analysis for complex rocks. *Transport in Porous Media*, 139(2), 301-325.

References (transliterated)

1. Kurovets' I. M., Mykhaylov V. A., Zeykan O. YU. ta in. (2014) *Netradytsiyni dzherela vuhlevodniv Ukrainy: monohrafiya u 8 knykhakh. Kn. I. Netradytsiyni dzherela vuhlevodniv: ohlyad problemy* Kyiv: Nika-tsentr, 208 s.
2. Vakarchuk S. H., Dovzhok T. YE., Filyushkin K. K. ta in. (2014) *Perspektyvy osvoyennya resursiv hazu ushchil'nykh porid u Skhidnomu naftohazonosnomu rehioni Ukrainy* Kn. VI. Kyiv: TOV «VT-S PRYNT», 208 s.
3. Vakarchuk S.H. Resursnyy potentsial netradytsiynykh vuhlevodniv ushchil'nykh karbonatnykh porid turneys'koho yarusu DDZ // *Naftohazova haluz' Ukrainy.* – 2015. – №5 – С. 46-49
4. Kristian Mogensen, Shehadeh Masalmeh, (2020) A review of EOR techniques for carbonate reservoirs in challenging geological settings, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 195, 107889, ISSN 0920-4105, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107889>
5. O.L. Zimin, I.H. Zezekalo, H.M. Bondar M.I. Yevdoshchuk (2019) *Perspektyvy rozrobky ushchil'nykh karbonatnykh kolektoriv u mezhakh Dniprovsk'o-Donets'koyi zapadyny Naftohazova haluz' Ukrainy, NAK Naftohaz Ukrainy* №2 14-18.
6. Huysang Yoo, Youngmin Kim, Wonsuk Lee, Jeonghwan Lee, An experimental study on acid-rock reaction kinetics using dolomite in carbonate acidizing, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 168, 2018, Pages 478-494, ISSN 0920-4105, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.05.041>.
7. Tan Peng, Jin Yan, Hou Bing, Zhou Yingcao, Zhang Ruxin, Chang Zhi, Fan Meng, Laboratory investigation of shale rock to identify fracture propagation in vertical direction to bedding, *Journal of Geophysics and Engineering*, Volume 15, Issue 3, June 2018, Pages 696–706, <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aaa5d6>
8. Zimin O.L. Udoskonalennya kyslotnykh rozchyniv dlya intensyfikatsiyi ushchil'nykh vysokotemperaturnykh karbonatnykh kolektoriv. *Tekhnolohichnyy audyt ta rezervy vyrobnytstva* - № 6/2021
9. Ali, M. T.; Nasr-El-Din, H. A. (2020) New Insights into Carbonate Matrix Acidizing Treatments: A Mathematical and Experimental Study *SPE JOURNAL* Volume: 25 Issue: 3 P: 1272-1284.
10. Esteves Ferreira, M., Rodrigues Del Grande, M., Neumann Barros Ferreira, R. et al. Full scale, microscopically resolved tomographies of sandstone and carbonate rocks augmented by experimental porosity and permeability values. *Sci Data* 10, 368 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02259-z>
11. Z. Q. Fan, Z.-H. Jin, S. E. Johnson, Modelling petroleum migration through microcrack propagation in transversely isotropic source rocks, *Geophysical Journal International*, Volume 190, Issue

1, August 2012, Pages 179–187, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05516.x>

12. Ruspini, L. C., Øren, P. E., Berg, S., Masalmeh, S., Bultreys, T., Taberner, C., ... & Wilson, O. B. (2021). Multiscale

digital rock analysis for complex rocks. *Transport in Porous Media*, 139(2), 301-325.

Відомості про авторів / About the Authors

Зімін Олег Леонідович (Zimin Oleh) – аспірант кафедри нафтогазової інженерії та технологій Національного університету полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка, м. Полтава, Україна; +380 97 971 73 10; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9281-0462> ; ziminoleg2@gmail.com

Зезекало Іван Гаврилович (Zezehalo Ivan) – професор кафедри нафтогазової інженерії та технологій Національного університету полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка, м. Полтава, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9962-6905>; 2012.nadra@gmail.com