

Дослідження та методи аналізу

УДК 550.832

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛАСТІВ-КОЛЕКТОРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ДАНИХ НОВІТНІХ КАРОТАЖНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

¹І. О. Федак, ¹Я. М. Коваль, ²І. М. Кузів¹ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727123, e-mail: meduzaf@ukr.net²УкрНДГаз, Львівський комплексний відділ; 79026, м. Львів, вул. Стрийська, 144, тел. (0322) 638024, e-mail: Ivan.kuziv@gmail.com

Існуючі технології пошуків і розвідки нафтогазонасичених горизонтів є ефективними для типових геологічних умов, але призводять до значних похибок під час дослідження складнобудованих пластів-колекторів. Саме в таких геологічних умовах сьогодні є перспектива виявлення нових покладів нафти і газу. Тому актуальною є проблема адаптації сучасних технологій до умов конкретних нафтогазових родовищ. Одним з напрямів вирішення цієї проблеми є створення адекватної моделі електричних властивостей пластів-колекторів. В такій моделі найважче математично описати структуру порового простору пласта-колектора з причини його значної неоднорідності. В існуючих моделях використовують опосередковані параметри для врахування впливу структури порового простору на питомий електричний опір пласта-колектора, що в багатьох випадках призводить до значних похибок. Для удосконалення моделі електропровідності гірської породи в даній роботі пропонується використати можливості сучасного свердловинного методу візуалізації ядерно-магнітного резонансу, який дає змогу безпосередньо оцінити структуру порового простору пласта-колектора.

Ключові слова: модель електропровідності гірської породи, низькоомні пласти-колектори, ядерно-магнітний каротаж, структура порового простору.

Существующие технологии поиска и разведки нефтегазонасыщенных горизонтов являются эффективными для типичных геологических условий, но приводят к значительным погрешностям при исследовании сложнопостроенных пластов-коллекторов. Именно в таких геологических условиях сегодня есть перспектива обнаружения новых залежей нефти и газа. Поэтому актуальной является проблема адаптации современных технологий к условиям конкретных нефтегазовых месторождений. Одним из направлений решения этой проблемы является создание адекватной модели электрических свойств низкоомных пластов-коллекторов. В такой модели труднее всего удастся математически описать структуру порового пространства пласта-коллектора по причине его значительной неоднородности. В существующих моделях используют косвенные параметры для учета влияния структуры порового пространства на удельное электрическое сопротивление пласта-коллектора, что во многих случаях приводит к значительным погрешностям. В данной работе предлагается для усовершенствования модели электропроводности горной породы использовать возможности современного скважинного метода визуализации ядерно-магнитного резонанса, который позволяет непосредственно оценить структуру порового пространства пласта-коллектора.

Ключевые слова: модель электропроводности горной породы, низкоомные пласты-коллекторы, ядерно-магнитный каротаж, структура порового пространства.

Existing technologies for prospecting and exploration of oil-and-gas saturated horizons are effective for typical geological conditions but cause significant errors when studying complex reservoirs. In such geological conditions today there is a prospect of discovering new oil and gas deposits. Therefore, the urgent problem is the adaptation of modern technologies to the conditions of particular oil and gas fields. One of the ways to solve this problem is to create an adequate model of the reservoir electrical properties. The most difficult thing in such a model is to mathematically describe the structure of the reservoir pore space due to its great heterogeneity. Indirect

parameters for taking into account the pore space structure influence on the reservoir electrical resistivity, which in many cases causes significant errors, were used in the existing models. In this paper we propose to use the possibilities of the modern borehole imaging method of nuclear magnetic resonance, which allows to evaluate the structure of the reservoir pore space, to improve the rock electrical conductivity model.

Key words: rock electrical conductivity model, low resistance reservoirs, nuclear magnetic logging, pore space structure.

Вступ. Одним з головних геологічних завдань, які вирішуються під час пошуків та розвідки покладів нафти і газу є виявлення у розрізах свердловин продуктивних інтервалів. Існує ряд прямих і опосередкованих методів та методик, за допомогою яких це завдання вирішується. Усі вони пов'язані з геофізичними дослідженнями та роботами у свердловинах.

До прямих методів відносяться роботи, які проводяться спеціальними геофізичними свердловинними приладами, що дають можливість безпосередньо відбирати проби пластових флюїдів в інтервалах проникних пластів. Позитивним моментом застосування такого способу визначення характеру насичення пластів-колекторів є практично стовідсоткова достовірність отриманих результатів. Але проведення таких робіт вимагає багато часу, пов'язане з технічною складністю і тягне за собою значні матеріальні витрати. Тому використання методів з відбору проб і флюїдів за допомогою свердловинних приладів обмежене та є обов'язковим тільки у певних категоріях свердловин.

Для виявлення в геологічних розрізах нафтогазових свердловин продуктивних інтервалів опосередкованими методами на практиці широко застосовують геофізичні дослідження свердловин на кабелі. Зокрема ефективними геофізичними методами для виявлення продуктивних порід-колекторів та визначення їх нафтогазонасичення є методи електричного каротажу. Незважаючи на те, що дані методи мають обмеження для використання їх у обсаджених свердловинах, вони є основними для визначення початкового нафтогазонасичення у відкритих стовбурах свердловин.

Отримані у процесі геофізичних досліджень позірні електричні опори пластів-колекторів відображають інформацію про пласт, спотворену рядом чинників, вплив яких необхідно враховувати під час оброблення результатів каротажів. В різних геологічних умовах необхідно враховувати наявність тих чи інших чинників та їх питомий вплив на покази електричних методів. А це завдання досить непросте, хоча існуючі методики в багатьох випадках дають позитивні результати з необхідним ступенем точності. Позитивний результат електрокаротажів отримують в основному під час досліджень покладів з типовими геологічними умовами, для яких розроблено стандартні методики інтерпретації. Наявність особливостей продуктивних пластів-колекторів (складна структура порового простору, присутність у мінеральному складі скелету гірської породи мінералів з високою електропровідністю чи інших геологічних неоднорідностей) вимагає індивідуального підходу до вирішення проблеми визначення їх характеру насичення.

Актуальність проблеми. На сьогоднішній день ефективність виявлення продуктивних горизонтів і достовірність визначення коефіцієнтів їх нафтогазонасичення різко знижує існування на багатьох родовищах низькоомних пластів-колекторів. Результати електрокаротажу таких пластів без використання індивідуальних петрофізичних моделей не дають змоги ефективно вирішувати вище згадані геологічні завдання. У традиційних методиках пластів-колектори з низьким питомим опором інтерпретуються як водоносні, хоча причиною низькоомності насправді може бути не вільна вода відкритих пор, а, наприклад, наявність мікротріщин зі зв'язаною водою, яка не впливає на характер отриманого з пласта продукту, але суттєво змінює електричні характеристики пласта. З цієї причини в розрізах нафтогазових свердловин часто пропускають продуктивні пласти та роблять значні похибки у визначенні коефіцієнтів нафтогазонасичення, що вказує на актуальність поставленої у роботі проблеми.

Над вирішенням даної проблеми тривалий час працюють такі вчені, як М. М. Елланський, В. А. Старостін, С. А. Вижва та ін. [1, 2, 3, 4]; закордонні геофізики де-Вітте, Хілл, Клав'єр, Ферензі та ін. [5, 6, 7, 8].

Перші дослідження дали змогу виділити основні провідники електричного струму у гірських породах – пластову воду і зв'язану воду, які володіють різними електричними характеристиками і тому окремо впливають на загальну величину питомого електричного опору пласта-колектора. Така особливість електропровідності гірських порід була відображена у петрофізичній моделі, названій моделлю «подвійної води». Дана модель стала основою для подальших досліджень з метою її удосконалення. Вчені, які працювали над вирішенням цієї проблеми, прагнучи підвищити ефективність моделі «подвійної води», добились врахування мінералізації пластової води на електропровідність різних компонент середовища, впливу звивистості каналів та величини ємності катіонного обміну між пластовою водою і поверхнею мінеральних частинок, рухливості іонів, пропорції цементуючих матеріалів різного типу, тощо. Проведені роботи суттєво підвищили якість моделі, дали змогу проводити її адаптацію до конкретних геологічних умов. Основним недоліком цієї моделі є труднощі оцінки згаданих вище параметрів та урахування структури порового простору пласта-колектора, яка визначає співвідношення у поровому просторі вільної і зв'язаної води, і, як наслідок, результуючого питомого електричного опору. Усі дані, які дають змогу налаштувати петрофізичну модель «подвійної води» до конкретних геологічних умов, підбравши відповідні коефіцієнти

ти, отримуються у петрофізичних лабораторіях в процесі дослідження ядерного матеріалу. Тобто, якість моделі залежить від наявності керну, повноти його відбору у свердловинах і досконалості методів, за допомогою яких проводять дані дослідження. Тому в багатьох випадках налаштування моделі «подвійної води» супроводжується суттєвими труднощами.

Не так давно у виробництво було впроваджено технологію на основі методу ядерно-магнітного каротажу, яка дає змогу оцінювати структуру порового простору пластів-колекторів безпосередньо у свердловині, виключаючи різноманітні об'єктивні і суб'єктивні чинники, що вносять суттєві похибки у результати лабораторних петрофізичних досліджень. В даній роботі пропонується використати можливості цього методу для спрощення процесу налаштування моделі «подвійної води» до конкретних геологічних умов і уникнення впливу негативних чинників на її якість.

Мета роботи. Дана робота має за мету удосконалення існуючої моделі електричного опору гірських порід, шляхом урахування особливостей структури їх порового простору за даними методу візуалізації магнітного резонансу.

Для досягнення поставленої у роботі мети необхідно вирішити ряд завдань:

- проаналізувати можливості та недоліки існуючої моделі електричного опору гірських порід, які враховують структуру порового простору мінерального скелету гірської породи;
- провести аналіз можливостей сучасної технології проведення ядерно-магнітного каротажу методом візуалізації ядерно-магнітного резонансу з визначення структури порового простору складнопобудованих пластів-колекторів;
- розробити на основі даних ядерно-магнітного каротажу параметр, який дасть змогу кількісно оцінити вплив структури порового простору пласта-колектора на його питомий електричний опір;
- удосконалити існуючу модель електричного опору гірських порід шляхом впровадження у неї розробленого параметру.

Огляд літератури. Класичним рівнянням, яке поєднує питомий електричний опір гірських порід з їх структурою порового простору є рівняння, запропоноване Арчі [9]:

$$P_n = \frac{\rho_{en}}{\rho_e} = K_n^{-b}, \quad (1)$$

та удосконалене радянським ученим В. М. Дахновим:

$$P_n = \frac{\rho_{en}}{\rho_e} = \frac{a}{K_n^b}, \quad (2)$$

де P_n – параметр пористості пласта-колектора;

ρ_{en} – питомий електричний опір повністю водонасиченого пласта-колектора, Омм;

ρ_v – питомий електричний опір пластової води, Омм;

a – коефіцієнт, який визначається мінеральним складом досліджуваних відкладів;

b – структурний показник, який визначається ступенем зцементованості досліджуваних відкладів.

Величина структурного коефіцієнта змінюється у межах від 1,3 для пухких пісковиків і оолітових вапняків до 2,2 для добре зцементованих низькопористих пісковиків, кварцитів, вапняків і доломітів з міжзерновою пористістю, крейди [9]. Необхідно зауважити, що значення структурного коефіцієнту визначається емпіричним шляхом на ядерному матеріалі для кожного родовища або окремого продуктивного горизонту індивідуально. Часто за відсутності достатньої кількості керну, використовують табличні дані структурного параметру, виходячи з опису мінерального складу досліджуваного пласта, що суттєво знижує достовірність розрахованих значень.

У середині минулого століття вчені довели, що параметр P_n залежить не тільки від пористості та мінералізації пластової води, але й від наявності в породі високодисперсних глинистих частинок. Встановлено, що зі збільшенням мінералізації пластової води, значення питомого електричного опору двох однакових пластів відрізняється тим більше, чим більше відрізняється їх глинистість. Цей ефект пов'язаний з існуванням поверхневої провідності, яка оцінюється однойменним параметром [10]:

$$P = \frac{P'_n}{P''_n}, \quad (3)$$

де P'_n – значення параметра пористості, визначене при насиченні керну розчином низької мінералізації;

P''_n – значення параметра пористості, визначене при насиченні керну розчином високої мінералізації.

Доведено [10, 11], що параметр провідності P має тісний зв'язок з приведеною ємністю катіонного обміну породи Q_n :

$$Q_n = \frac{Q_{100}}{100 \times \left[\frac{(1 - K_n)}{K_n} \right] \times \delta}, \quad (4)$$

де Q_n – ємність катіонного обміну твердої фази гірської породи, мг-екв/м³;

K_n – коефіцієнт пористості гірської породи;

δ – густина твердої фази гірської породи, кг/м³.

На основі цього у кінці 1950-х років Б. Ю. Вендельштейн, І. Є. Ейдман та С. Д. Пірсон незалежно один від одного запропонували модель електропровідності гірської породи, в подальшому названу моделлю «двох вод» [10, 11]:

$$\sigma = \omega \times \sigma_{ee} + (1 - \omega) \times \sigma_{3e}, \quad (5)$$

де σ – електропровідність гірської породи, См/м;

$\sigma_{вв}$ – електропровідність вільної води, См/м;

$\sigma_{зв}$ – електропровідність зв'язаної води, См/м;

ω і $(1-\omega)$ – долі об'ємів порового простору, зайнятого вільною і зв'язаною водами.

На відміну від попередніх моделей, дана модель передбачає, що електропровідність вільної і зв'язаної води відрізняються та мають різний вплив на електропровідність гірської породи.

Працюючи з цією моделлю Б. Ю. Венделштейн дослідив теоретично, а М. М. Елланський емпірично, що при високій мінералізації пластової води електропровідність породи зі збільшенням глинистості не збільшується, а зменшується [2]. Подальші дослідження дали змогу уточнити дану закономірність. Було показано, що не тільки для водонасичених, але й для продуктивних порід при високій мінералізації пластової води ($\rho_{neu} > \rho_e$) глинистість підвищує опір гірської породи, а при низькій ($\rho_e > \rho_{neu}$) – знижує [12]. Отже, величина питомого опору подвійного електричного шару (ПЕШ), не залежить від мінералогічного складу і кількості глинистого матеріалу, а залежить від його структури. Врахування даної закономірності та припущення, що подвійний електричний шар і адсорбована на глинистій поверхні пор вода займають один і той самий об'єм, була запропонована наступна модель електричного опору продуктивних глинистих порід з міжгранулярною пористістю [12]:

$$\frac{\rho_n}{\rho_e} = \frac{1}{(K_n K_e)^m} \times \frac{1}{1 - \frac{K_{zл} \omega_{адс}}{K_n K_e} \times \left(1 - \frac{\rho_{neu}}{\rho_e}\right)}, \quad (6)$$

де ρ_n і ρ_e – питомі електричні опори породи і пластової води відповідно, Омм;

K_n , K_e і $K_{zл}$ – коефіцієнти відкритої пористості, водонасичення і об'ємної глинистості відповідно;

$\omega_{адс}$ – вміст адсорбованої води в долях об'єму глинистого матеріалу;

ρ_{neu} – питомий електричний опір подвійного електричного шару, Омм;

m – константа, аналогічна структурному коефіцієнту в моделі Дахнова-Арчі.

В даній моделі враховано паралельне включення каналів з вільною і адсорбованою водою. При змішаному типі включення каналів модель набуває наступного вигляду [12]:

$$\frac{\rho_n}{\rho_e} = \frac{1}{(K_n K_e)^m} \times \left(\frac{\rho_{neu}}{\rho_e}\right)^{\frac{K_{zл} \omega_{адс}}{K_n K_e}}, \quad (7)$$

де $\frac{K_{zл} \omega_{адс}}{K_n} = \beta_{zл}$ – відносна глинистість або

доля об'єму відкритих пор, зайнятих адсорбованою водою.

Удосконалена модель електропровідності відображає усі можливі варіанти впливу глинистості на питомий електричний опір породи. Для практичного застосування моделі необхід-

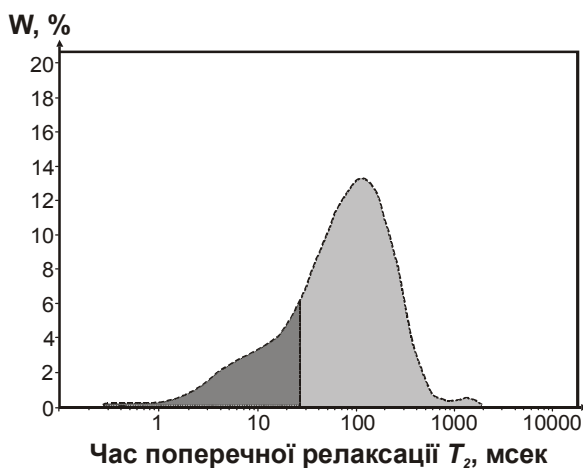
но знати, як змінюється доля пор, заповнених адсорбованою водою і подвійним електричним шаром $\beta_{zл}$ і питомий опір подвійного електричного шару. Тобто, автори досліджень намагаються в моделі електропровідності опосередковано, через структуру мінерального скелету, врахувати характеристики подвійного електричного шару, оскільки не бачать прямого методу для такої оцінки.

У даній роботі пропонується вирішити цю проблему, застосовуючи можливості сучасної технології ядерно-магнітного каротажу, яка дає змогу безпосередньо, в процесі свердловинних досліджень оцінити у продуктивному пласті пропорції флюїдів різного типу.

Методи дослідження. Фізичні основи ядерно-магнітного каротажу (ЯМК) були розроблені за довго до того, як з'явилась технологія і апаратура, здатні ефективно вирішувати геологічні завдання. Сьогодні західними сервісними компаніями широко застосовується модифікація ЯМК – метод візуалізації магнітного резонансу (MRIL). Унікальною цю технологію робить інформація, яку можна отримати під час каротажу свердловин: кількість флюїдів у породі, їх властивості та розподіл у порах різного розміру. З точки зору ядерно-магнітного резонансу властивості флюїду в поровому просторі помітно відрізняються від властивостей рідини у вільному стані. При зменшенні розміру пор, які містять воду, зростає різниця між позірними властивостями порової і вільної води. Мікропористість, пов'язана з глинами і деякими іншими мінералами, зазвичай містить воду, яка, з точки зору ядерно-магнітного резонансу, веде себе практично як тверда речовина. Зв'язана вода характеризується дуже малим часом релаксації протонів водню. Не зважаючи на це сучасні каротажні зонди MRIL, реєструють усі флюїди порового простору.

За відсутності штучного магнітного поля протони водню порових флюїдів, які можна апроксимувати елементарними магнітними диполями, орієнтовані хаотично. Під час ЯМК, за допомогою свердловинного зонда у досліджуваному пласті створюють магнітне поле, яке активізує протони. Поле постійних магнітів повертає або поляризує осі спінів протонів водню у напрямку результуючого вектора напруженої магнітного поля. Потім вмикається осцилююче поле свердловинного приладу, яке розвертає ці протони, виводячи їх з рівноважного стану. Після припинення дії осцилюючого поля, протони починають повертатися у початкове положення (релаксувати). Використовуються спеціально розроблені послідовності імпульсів для генерування серій так званих ехо-сигналів спінів, які потім вимірюються приладом MRIL. Для реєстрації спаду ехо-сигналу, свердловинний прилад MRIL фіксує амплітуди окремих ехо-імпульсів від спінів у часі. Амплітуда спаду ехо-сигналу спіна, описується серією експоненційних функцій, з різними декрементами. Послідовність коефіцієнтів загасання утворює спектр загасання (спаду) або розподіл часу по-

перечної релаксації T_2 протонів водню. Для водонасиченої породи математично доведено [13], що крива спаду, пов'язана з одиночним часом, буде описуватися однією експонентою, декремент якої пропорційний розміру пори; таким чином, маленьким порам будуть відповідати менші значення T_2 , а у крупнішим - великі. У будь-якому пласті поровий простір представлений порами різного розміру. Тому, розподіл пористості буде описуватися багатоекспонентним спадом, з кожним значенням T_2 , яке відповідає своєму розміру пор (рис. 1).



■ - сумарний об'єм зв'язаної і залишкової води
 ■ - об'єм вільного флюїду

Рисунок 1 – Інверсія амплітуд ехо-сигналів в розподіл часів поперечної релаксації T_2 [14]

Розподіл сигналу T_2 , фактично є відображенням розподілу порового простору породи. Це твердження доведено науковцями Halliburton Energy Services [15]. Дані ядерномагнітного каротажу були порівняні з результатами лабораторних досліджень методом ртутної порометрії (рис. 2). Розподіл T_2 добре збігається з даними розміру порових каналів, отриманих у лабораторії, що пояснюється тісною кореляцією цих параметрів в осадових породах.

Методом ртутної порометрії нами були проведені дослідження зразків керну, отриманих з свердловин Лопушнянського нафтового родовища [16]. Вибір методу обґрунтований його високою роздільною здатністю при дослідженні порід-колекторів, структура яких виповнена пустотами малого діаметру, швидкістю експерименту, використання зразків керна малого розміру, а також шламу. Відібрані зразки керну із карбонатних продуктивних порід, що нами вивчались, характеризуються значною неоднорідністю структури порового простору. У формуванні колекторських властивостей карбонатних порід істотну роль відіграють пористі вторинного походження, і в першу чергу тріщинуватість.

Керн, в основному, представлений вапняками, рідше доломітами. Переважна більшість вапняків крейдоподібні, кавернозні, еродовані і

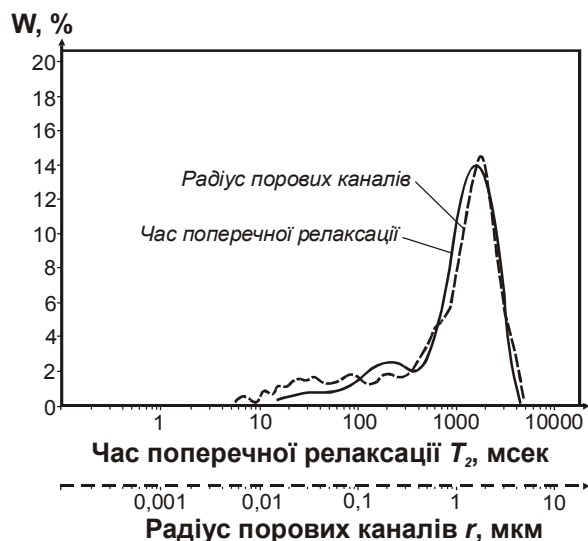


Рисунок 2 – Кореляція розподілу часів поперечної релаксації T_2 за ЯМК та радіусів порових каналів r , отриманих методом ртутної порометрії [15]

тріщинуваті. Пористість окремих уламків складає від 7,6 % до 18,2 %. Дослідження шліфів свідчать про наявність мікротріщин складної структури і форми. Виявлено відкриті щілинподібні пори, каверни різної форми і об'єму. У зв'язку з тріщинуватістю, винос керну невисокий. В двох свердловинах №4 та №11 планувався винос керну в межах 70%; фактично було відібрано 20,1 м і 38,5 м керна, що склало, відповідно, 55,7% та 45%. Відібраний керн із інтервалів глибин 4300 – 4316 м, 4323 – 4380 м та 4440 – 4465 м свердловин №4, 5, 6, 8, 9, 11 Лопушнянського нафтогазового родовища досліджувався комплексом лабораторних петрофізичних методів, у тому числі і методом ртутної порометрії.

Ртутна порометрія дозволяє визначити розмір радіусів звужень, через які здійснюється зв'язок більш широких ділянок порових каналів між собою. Фізична суть методу базується на явищі капілярності. Ртуть, як речовина, що не змочує поверхню твердої фази породи, може проникати у поровий простір (канали, пори) гірських порід при створенні певного тиску, величина якого визначається рівнянням Лапласа:

$$P_k = \frac{2\sigma \cos \theta}{r}, \quad (8)$$

де P_k – капілярний тиск, Па;
 σ – поверхня натягу ртуті, дн/см²;
 θ – кут краєвий кут змочування ртуті, град;
 r – радіус капіляру, м.

Група пор із певним радіусом буде заповнюватися ртуттю при заданому рівноважному тиску. Тому при ступінчастому збільшенні тиску у системі ртуть-пористе тіло і відповідним вимірюванням об'єму ртуті, яка вдавнена в пористе середовище можна одержати криву залежності об'єму ртуті, що проникла в пори від тиску. Метод вдавлювання ртуті характеризується відомими припущеннями, які слідує із формули (8), справедливими для капілярів цилінд-

ричної форми, а також в припущенні про нестискуваність твердої фази породи від прикладеного до неї тиску, сталості поверхневого натягу і кута змочування ртуті при зміні тиску.

Маючи можливість вимірювати об'єм ртуті, що увійшла у порові канали при певному (від 0,008 до 20 МПа) тиску, легко визначити об'єм порового простору, що має радіуси порових каналів певного розміру.

Апаратура для проведення експерименту складається із компенсаційного об'ємометра і ртутного порометра високого тиску. Компенсаційний об'ємомір дозволяє визначити об'єм скелета пористих тіл любой форми, в тому числі і шламу. В основу роботи приладу покладений закон Бойля-Маріотта для реальних газів, так як вимірювання об'єму твердої фази породи здійснюється за кімнатної температури і тиску 0,2 МПа. Об'ємомір складається із двох систем – робочої і компенсаційної. Остання уведена для виключення помилок, що виникають за рахунок неточності вимірювання тиску. Системи об'єднані U – подібним манометром для точно-го урівноваження тиску в них.

Ртутний порометр високого тиску складається із системи нагнітання ртуті і компенсаційної системи, за допомогою якої ртуть постійно підтримується на рівні електроконтакта. В поровому просторі породи ртуть закачується шляхом ступінчастого підвищення тиску, яке фіксується манометрами на кожному ступені, а також знімаються відліки об'єму ртуті, що закачується з точністю до $45 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3$.

За одержаними даними визначається загальний об'єм зразка (V_n), що представляє собою різницю об'єму камери без зразка і зі зразком для точки, яка відповідає початку просочування ртуті у зразок. Така точка визначається за графіком, що побудований у координатах $(1/P_k) - (V_{Hg})$. Різке збільшення V_{Hg} при незначному збільшенні тиску свідчить про початок просочування ртуті. Об'єм скелету взірця ($V_{ск}$) перед дослідженнями визначається волюметричним способом. За відомим об'ємом зразка V_n і об'ємом матриці породи знаходиться об'єм пустотного простору:

$$V_{пор} = V_n - V_{ск} \quad (9)$$

Дальше розраховується пористість за повітрям, відсоток об'єму пор, які заповнені ртуттю при певному тиску, літолого-структурний коефіцієнт, ефективний радіус пор, проникність і її розподіл за радіусами пор.

Розрахунковим шляхом визначається вміст пор з радіусом до 0,1 мкм (аналог з вмістом міцно-зв'язаної води з товщиною плівки до 0,1 мкм) і вміст пор з радіусом до 1,0 мкм (аналог з вмістом міцно- і пухкозв'язаної води з товщиною плівки до 1,0 мкм).

За одержаними даними будується крива капілярного тиску насичення. Підставивши у формулу (8) значення поверхневого натягу ртуті, яке рівне 480 дн/см^2 , і значення кута змочування ртуті – 140° , визначаємо радіус кривизни менісків, що ототожнюється з еквівалентним радіусом порових каналів:

$$r = \frac{7,5}{P_k} \quad (10)$$

Тоді будемо інтегральну криву розподілу еквівалентних радіусів порових каналів у загальному об'ємі зразка при попаданні ртуті в порові канали стандартних розмірів: 0,10; 0,16; 0,25; 0,40; 0,63; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,3; 10,0; 16,0; 25,0; 40,0; 63,0; 100 мікрометрів. За знайденими значеннями будується гістограма розподілу груп порових каналів різного діаметру.

Отримані результати. Вирішуючи задачу розроблення параметру, який дасть змогу кількісно оцінити вплив структури порового простору пласта-колектора на його питомий електричний опір, нами було запропоновано замінити у формулі (7) показник степеня, який відображає частку об'єму відкритих пор, зайнятих адсорбованою водою через опосередковані коефіцієнти (глинистості, пористості, вмісту адсорбованої води в долях об'єму глинистого матеріалу), прямим коефіцієнтом, який випливає з результатів свердловинних досліджень методом ядерно-магнітного каротажу.

Використовуючи сучасну технологію та апаратуру методу візуалізації магнітного резонансу у свердловині в результаті каротажу отримують ряд параметрів, що характеризують фізичні властивості флюїдів гірської породи, серед яких є три, що дають змогу оцінити кількість фізично зв'язаної та вільної води: BVI – кількість залишкової води; $MCBW$ – кількість глинисто-зв'язаної води; $MSIG$ – загальна пористість пласта-колектора. Відношення цих параметрів $\left(\frac{BVI + MCBW}{MSIG} \right)$ вкаже нам частку об'єму відкритих пор, зайнятих адсорбованою водою. В результаті удосконалена модель електричного опору гірських порід отримає наступний вигляд:

$$\frac{\rho_n}{\rho_e} = \frac{1}{(K_n K_e)^m} \times \left(\frac{\rho_{new}}{\rho_e} \right)^{\left(\frac{BVI + MCBW}{MSIG \times K_e} \right)} \quad (11)$$

Опробування моделі було проведено на зразках керну з свердловин № 4 і № 11 Лопушнянського нафтового родовища. Дані зразки досліджувались на предмет структури порового простору методом ртутної порометрії (табл. 1), їх електричних та фільтраційно-ємнісних властивостей. Дослідження проводились при насиченні зразків розчином солі $NaCl$ мінералізацією $C=200 \text{ г/л}$, що повторює насичення гірських порід у свердловинних умовах. За результатами лабораторних досліджень з використанням формули Арчі (1) розраховані значення параметра пористості. Для розрахунків приймалося значення питомого електричного опору пластової води рівне $\rho_e = 0,05 \text{ Ом}$. Дане значення отримане з використанням номограми $\rho_e = f(C_e)$ [17], враховуючи значення температури гірських порід $T=125^\circ\text{C}$. Маючи значення відносного опору і пористості зразків керну, визначеної у лабораторії, було розраховано значення струк-

Таблиця 1 – Результати ґрунтової порометрії порід Лопушницького нафтового родовища (св. №№ 11, 4)

№ св.	Інтервал, м	№ зразка	Радіус пор., мкм																					
			до 0,10	0,10-0,16	0,16-0,25	0,25-0,40	0,40-0,63	0,63-1,00	1,00-1,60	1,60-2,50	2,50-4,00	4,00-6,30	6,30-10,0	10,0-16,0	16,0-25,0	25,0-40,0	40,0-63,0	63,0-100,0						
Лопушніа - 4	4181-4188	1280	42,59	1,26	10,41	1,89	4,10	6,94	4,41	4,41	0,07	0,07	4,41	1,58	4,41	1,90	5,04	3,47	2,84	2,21				
			33,17	5,03	5,42	3,11	8,92	4,65	2,71	5,81	2,02	4,34	1,94	9,69	0,06	0,42	0,45	3,07	5,23	10,81	27,05	52,80		
	4181-4188	1281	28,12	1,23	4,89	3,27	2,86	2,04	0,81	2,45	0,01	0,01	0,02	0,02	0,05	0,19	0,79	2,75	7,34	11,80	13,47	8,98		
			20,09	4,52	3,71	5,35	5,52	4,12	4,12	3,29	1,64	4,12	13,35	7,64	4,42	7,82	11,16	31,79	53,22	7,00	3,29	41,34		
	4194-4200	1285	21,79	1,64	2,15	3,78	1,89	2,70	3,52	2,70	0,01	0,02	0,07	0,09	2,44	3,88	17,30	4,86	4,60	22,16				
			32,75	4,46	2,97	7,01	3,82	4,46	4,88	2,34	2,07	2,12	2,97	3,82	2,76	7,86	6,37	9,34	18,88	69,46	2,62	52,78		
	4200-4206	1288	65,88	2,50	0,88	2,51	2,39	0,66	2,07	0,01	0,01	0,01	0,02	0,06	0,77	1,96	1,53	3,05	3,81	3,81	3,49	2,62	52,78	
			18,92	0,42	6,40	2,57	6,97	2,58	1,28	6,01	1,59	7,73	3,43	6,44	19,74	10,73	2,15	3,00	42,57					
	4210-4216	1292	15,75	7,08	6,30	10,24	8,66	7,08	3,94	3,94	0,05	0,04	0,44	5,51	10,24	14,17								
			31,10	2,41	1,11	0,78	2,40	0,52	1,03	2,83	5,84	9,02	32,74	10,22	40,97									
	4216-4222	1293	61,45	2,46	0,75	0,87	1,30	0,29	1,45	1,31	2,17	7,10	6,96	6,95	6,96									
							0,01	0,01	0,05	0,11	0,48	3,94	9,68	24,68	61,08									

Таблиця 2 – Результати визначення петрофізичних властивостей зразків гірських порід Лопушнянського нафтового родовища (св. №11, № 4)

№ св.	Інтервал, м	№ зразка	P	K _п , %	m	$\frac{BVI+MCBW}{MSIG}$	$\rho_{пп}^{БМК}$, Омм	$\rho_{п}^{розр}$, Омм	$\rho_{п}^{розр}$ (середнє по інтервалу), Омм	δ розр, %	
Лопушна - 11	4181-4188	1280	56	12,7	1,9506	0,6025	7,3	4,5	7,6	3,5	
	4181-4188	1281	84	11	2,0073	0,4673		6,1			
	4181-4188	1282	172	9,9	2,2258	0,4322		12,1			
	Лопушна - 11	4194-4200	1285	248	7	2,0732	0,3919	41,0	16,9	40,8	0,5
		4194-4200	1286	1200	3,9	2,1854	0,3395		78,4		
		4194-4200	1287	350	7	2,2028	0,5547		27,1		
		4200-4206	1288	37	16,5	2,0040	0,7482		3,4		
	Лопушна - 11	4210-4216	1292	137	9,7	2,1088	0,3786	8,9	9,2	9,2	3,4
		4216-4222	1293	176	6,7	1,9128	0,2283	10,1	10,5	10,5	4,0
Лопушна - 4		4210-4218	4-4	66	12,4	2,0070	0,3540	4,5	4,4	4,4	2,2
	4142-4148	4-11	1392	1,7	1,7765	0,6553	120	116,7	116,7	2,8	

турного коефіцієнта m . Опір води подвійного електричного шару визначався з використанням залежності $\sigma = f(C_e)$ (рис. 3) [18]. Усі згадані параметри занесено у таблицю 2 і використано для визначення розрахункових значень за удосконаленою моделлю електричного опору гірських порід.

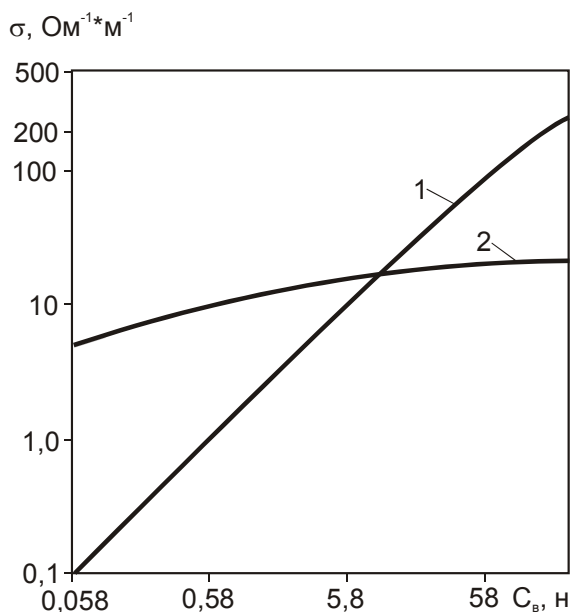


Рисунок 3 – Співвідношення електропровідностей подвійного електричного шару $\sigma_{пеш}$ (1) і вільного розчину σ_e (2) [18]

Результати ртутної порометрії свідчать, що за параметрами структури порового простору зразки ядерного матеріалу, які були відібрані з продуктивних інтервалів свердловин Лопушнянського родовища можна віднести до IV – VI

класу за О. О. Ханіним [19]. Сумарний вміст мікропор з радіусом звужень до $0,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ змінюється від 3 % до 85 %. Також спостерігається тенденція до збільшення частки мікропор в загальному об'ємі породи при зменшенні її пористості (див. табл. 1). Частка об'єму відкритих пор, зайнятих зв'язаною водою, змінюється в межах від 0,23 до 0,75. Частка загального об'єму порового простору, зайнята зв'язаною водою, обумовлена наявністю глинистого матеріалу, так і карбонатного цементу з мікротріщинуватою структурою. Саме ця частина води у пласті-колекторі є тим чинником, який призводить до похибок у визначенні характеру насичення та коефіцієнтів насичення продуктивних пластів-колекторів за даними електричних методів.

Розраховані за удосконаленою моделлю електричного опору гірських порід значення питомого електричного опору зразків керну співставлялись з фактичними значеннями питомого електричного опору ближньої зони пласта-колектора, отримані під час інтерпретації даних БМК свердловин № 11 і № 4 Лопушнянського нафтового родовища. Результати співставлення вказують на незначну похибку розрахунків (діапазон похибок становить 0,5 – 4 %), що вкладаються у загальноприйнятну допустиму межу для геофізичних досліджень 5%.

Наукова новизна. Уперше запропонована модель електропровідності гірських порід, у якій коефіцієнт, що визначає структуру порового простору гірської породи отримується не у лабораторних умовах за результатами дослідження обмеженої кількості ядерного матеріалу, а безпосередньо за результатами прямого методу дослідження свердловин – ядерно-магнітного каротажу.

Практична цінність. Запропонована модель електропровідності гірських порід дає змогу уникнути помилок при виділенні продуктивних пластів-колекторів з складною структурою порового простору. Зокрема це стосується нафтогазонасичених пластів-колекторів зі значною мікротріщинуватістю, які характеризуються нетиповими для продуктивних порід низькими електричними опорами. Не врахування цієї особливості часто веде до помилкової інтерпретації нафтогазонасиченого пласта, як водоносного.

Висновки

Провівши аналіз існуючих моделей електропровідності гірських порід, виявлено, що їх основним недоліком є труднощі оцінки впливу мінералізації пластової води на електропровідність різних компонент середовища, впливу звивистості каналів та величини ємності катіонного обміну між пластовою водою і поверхнею мінеральних частинок, рухливості іонів, пропорції цементуючих матеріалів різного типу та урахування структури порового простору пласта-колектора, яка визначає співвідношення у поровому просторі вільної і зв'язаної води. Усі дані, які дають змогу налаштувати петрофізичну модель «подвійної води» до конкретних геологічних умов, підібравши відповідні коефіцієнти, отримуються у петрофізичних лабораторіях в процесі дослідження ядерного матеріалу. Тобто, якість моделі залежить від наявності керну, повноти його відбору у свердловинах і досконалості методів, за допомогою яких проводять дані дослідження. Тому в багатьох випадках налаштування моделі «подвійної води» супроводжується суттєвими труднощами.

Поява сучасної технології та апаратури ядерно-магнітного каротажа (методу візуалізації ядерно-магнітного резонансу) дає змогу оцінювати структуру порового простору пластів-колекторів безпосередньо у свердловині, включаючи різноманітні об'єктивні і суб'єктивні чинники, що ускладнюють отримання необхідних параметрів у петрофізичних лабораторіях. Зокрема за допомогою даного методу реструють параметри, які кількісно відображають об'єми зв'язаної і вільної вод у поровому просторі пласта-колектора. В результаті проведених досліджень вдалось на основі цих параметрів розробити коефіцієнт, який у рівнянні математичної моделі електричного опору гірських порід дає змогу кількісно оцінити вплив структури порового простору пласта-колектора на його питомий електричний опір.

Література

- 1 Элланский М. М. Петрофизические основы комплексной интерпретации данных ГДС (Методическое пособие) / М. М. Элланский. – М.: ГЕРС, 2001. – 229 с.
- 2 Вендельштейн Б. Ю. Влияние адсорбционных свойств породы на зависимость относительного сопротивления от коэффициента по-

ристости / Б. Ю. Вендельштейн, М. М. Элланский // Прикладная геофизика. – 1964. – Вып. 40. – С. 181-193.

3 Старостин В. А. Индивидуальное моделирование электропроводности газонасыщенных порид-колекторів складної будови / В. А. Старостин, Я. М. Коваль // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2008. – № 1(26). – С. 30-37.

4 Вижва С. А. Оцінка структури пустотного простору колекторів за даними ГДС та петрофізичних досліджень / С. А. Вижва, І. М. Безродна // Вісник Київського університету. Геологія. – 2009. – №47. – С. 38-42.

5 D Witte L. Relations between resistivities and fluid contents of porous rocks / L. D. Witte. Oil and Gas J. 1950. Vol. 16. – P. 120.

6 Hill H. J. Bond water in shaly sands-its relation to Q_v and other formation properties / H. J. Hill, O. J. Shirley, G. E. Klein // Log Analyst. – 1979. Vol. XX. – P. 3-19.

7 Clavier C. Theoretical and experimental bases for the dual-water model for interpretation of shaly sands / C. Clavier, G. Coates, J. Dumanoir // Soc. Pet. Engrs. J. – 1984. Vol. 24. – P.153-167.

8 Ferenczy L. Direct determination of cementation exponent for dual water type models from logs / L. Ferenczy // Trans. SPWLA. Ann. Logging Symp. – 1991. X. – P 24-32.

9 Pirson S. J. Oil reservoir engineering / S. J. Pirson // Second edition – New-York—Toronto—London : McGraw-Hill book Co, Inc., 1958. – 570 p.

10 Дахнов В. Н. Промысловая геофизика / В. Н. Дахнов. – М.: Гостоптехиздат, 1959. – 235 с.

11 Эйрман И. Е. Об электрокаротажных параметрах / И. Е. Эйрман // Прикладная геофизика. – 1956. – № 14.

12 Элланский М. М. Петрофизические связи и комплексная интерпретация данных промысловой геофизики. / М. М. Элланский – М.: Недра, 1978. – 370 с.

13 Kenyon W. E. Nuclear magnetic resonance as a petrophysical measurement / W. E. Kenyon. – Nuclear Geophysics, – 1992, v. 6, № 2, p. 153-171.

14 Аккурт Р. Новые возможности ядерно-магнитного каротажа. / [Р. Аккурт, Г. Нэйт Бакман, Чен Као Мин и др.] // Нефтегазовое обозрение. – 2008–2009. – Том 20. – № 4.

15 Коатес Д. Р. Каротаж ЯМР. Принципы и применение. / Д. Р. Коатес, Л. Ч. Хиао и М. Д. Праммер. – Хьюстон: Халлибуртон Энерджи Сервисез. – 2001. – 342 с.

16 Визначення нафтогазоперспективних ділянок в межах другого тектонічного поверху Бориславсько-Покутської зони, створення петрофізичних моделей, визначення колекторських властивостей і насичення карбонатів в Карпатській НГП та побудова комплексних моделей ділянок перспективних на нафту і газ в межах південно-східної частини Волино-Поділля / Звіт про науково-дослідну роботу. – Івано-Франківськ: НДІНЕЕ, 2007. – 544.

17 Добрынин В. М. Петрофизика (Физика горных пород): учеб. для вузов, 2-ое изд., пере-

раб. и доп. / В. М. Добрынин, Б. Ю. Вендельштейн, Д. А. Кожевников. – М.: ФГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2004. – 368 с.

18 Вендельштейн Б. Ю. О связи между параметрами пористости, коэффициентом поверхностной проводимости, диффузионно-адсорбционной активностью и адсорбционными свойствами терригенных пород / Б. Ю. Вендельштейн // Труды МИНХ и ГП – 1960. – № 31.

19 Ханин А. А. Породы-коллекторы нефти и газа и их изучение / А. А. Ханин. – М.: Недра, 1969. – 368 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
30.04.15

Рекомендована до друку
професором Кондратом О.Р.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
канд. геол. наук Чорним О.М.
(ГПУ «Львівгазвидобування», м. Львів)