

ІНДИВІДУАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ГАЗОНАСИЧЕНИХ ПОРІД-КОЛЕКТОРІВ СКЛАДНОЇ БУДОВИ

В.А. Старостін, Я.М. Коваль

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42056,
e-mail: geophys@nuing.edu.ua

Неточність інтерпретації даних електрометрії свердловин пов'язана з наявністю макро- та мікро-неоднорідностей в будові порового простору пластів-колекторів, що призводить до похибки у визначенні підрахункових параметрів, зокрема коефіцієнта насичення. Пропонується враховувати особливості будови порового простору пластів-колекторів через нормовану функцію, яка залежить від градієнта функції $P_n=f(K_s)$. Запропонована методика дозволяє значно підвищити достовірність визначення коефіцієнта насичення за даними електрометрії свердловин.

Ключові слова: свердловина, насичення, породи-колектори, пористість, відклади.

Неточность интерпретации данных электрометрии скважин связана с наличием макро- и микро-неоднородностей в строении порового пространства пластов-коллекторов, что приводит к погрешности в определении подсчетных параметров, в частности коэффициента насыщения. Предлагается учитывать особенности строения порового пространства пластов-коллекторов через нормируемую функцию, которая зависит от градиента функции $P_n=f(K_s)$. Предложенная методика позволит значительно повысить достоверность определения коэффициента насыщения по данным электрометрии скважин.

Ключевые слова: скважина, насыщение, породы-коллекторы, пористость, отложения.

The uncertainty data interpretation of electric logging of wells associated with the The inaccuracy of electrologging data interpretation associated with the presence of macro-and micro-inhomogeneities in the structure of reservoir porous reservoir, leads to errors in determining the calculated parameters, including saturation coefficient. The work suggests taking into account the structural features of reservoir porous space through normalized function which depends on the function gradient $P_s=f(K_w)$. The proposed method will significantly improve the accuracy of determining the saturation coefficient according to the electrologging data.

Keywords: well, enrichment, pores-collectors, porosity, adjournment.

Створенню геолого-фізичних моделей присвячено багато наукових праць. Моделювання дає змогу прогнозувати властивості геологічного об'єкта за відсутності експериментальних спостережень і розраховувати значення геологічних параметрів за інформацією геофізичних полів.

Головною особливістю геолого-фізичної моделі повинна бути її змістовність. Змістовність дає змогу розкривати причинно-наслідкові зв'язки у геологічних об'єктах, тобто отримувати нові наукові результати. Створені змістовні геолого-фізичні моделі, враховуючи те, що геологічні об'єкти є багатопараметричними системами, повинні бути багатомірними. Багатомірні моделі у нафтогазовій геології є імовірнісними, що пов'язано із:

– складністю вимірювання всіх параметрів для вивчення закономірностей у складнобудованих системах і тому, моделі, які не включають всі існуючі параметри відносяться до імовірнісних;

– використанням у вибраній моделі оптимально наближеного математичного опису, чим вноситься похибка апроксимації;

– можливими похибками оцінки вимірних параметрів моделі, що зумовлюється статистичним підходом до оцінки величини параметрів;

– використанням характеристик об'єктів різних рівнів дослідження.

Слід зазначити, що напрямок фізичного моделювання має дуже велике значення для

побудови моделей порід-колекторів з складною будовою. Вивчення природи фізико-хімічних процесів, що ускладнені неоднорідністю будови скелета породи, дасть змогу встановити межі дії залежностей фізичних характеристик і вивчити їх співвідношення.

При моделюванні головною вимогою є відповідність модельних побудов до реального відображення експериментально отриманих геолого-геофізичних параметрів. Умова про відповідність модельних побудов, тобто заміни реального середовища моделлю, створює значні переваги при вивченні геологічного середовища: модель дозволяє створювати точне математичне співвідношення між характеристиками об'єкта дослідження; модель дозволяє досліджувати важливі характеристики, які експериментально вивчити дуже важко з причини малої кількості взірців із значною диференціацією параметра; модель дозволяє проводити прогнозування параметрів об'єкта дослідження і здійснювати вибір оптимальної гіпотези з числа запропонованих для геологічного середовища.

Створенню моделей, що характеризують зв'язки фізичних і геологічних параметрів продуктивних відкладів, присвячено низку наукових і прикладних досліджень вчених Кобранової В.Н. [1], Дахнова А.В. [2], Елланської М.М. [3], Леонтьєва Е.І. [4], Вендлера Л.Е. [5], Нестерової Г.В. [6], Кнеллера Л.Е. [7], Старостіна В.А. [8], Карпенка О.М. [9], Ізотової Т.С. [10].

Виходячи з результатів їх досліджень модель електропровідності породи-колектора можна загалом можна описати функцією:

$$\sigma_n = f(\sigma_1, \sigma_2 \dots \sigma_i, \xi_1, \xi_2 \dots \xi_n, g, r_{пор}, d_3 \dots C_i), \quad (1)$$

де: σ_n – питома електропровідність породи, См/м;

σ_i – питома електропровідність компонент, які складають породу, См/м;

ξ – частка компонент, з яких складається скелет породи, ч.од.;

g – геометрія порового простору;

$r_{пор}$ – радіус пор, мм;

$d_{зер}$ – діаметр зерен, мм;

C_i – ступінь упаковки.

Створення геолого-фізичних моделей спрямоване здебільшого на отримання узагальнених залежностей, які описували б широкий діапазон зміни параметрів геологічного об'єкта. Така постановка задачі розширює можливості моделювання. Але є і негативні риси, які пов'язані з необхідністю вибору багатьох параметрів, що не входять у геологічний опис конкретного регіону дослідження. Конкретизація чинників, що притаманні певним геологічним умовам, при побудові моделі електропровідності дозволить виділити основні чинники, які змінюють електропровідність порід-колекторів. Нами пропонується створювати індивідуальні моделі електропровідності, які описують вплив геологічної ситуації на поле електропровідності та дають змогу визначити характер насичення породи-колектора за розподілом цього поля.

Для побудови індивідуальних моделей електропровідності розглянемо різні геологічні ситуації на прикладі мономіктових неглинистих пісковиків Тимофіївського, Куличихинського родовищ.

У роботі Г.В. Нестерова [6] вказано, що всі моделі, для яких електропровідність скелету породи прямує до нуля (чисті пісковики), можна описати формулою Арчі. Але зміна структури порового простору, геометрії окремих зерен відображаються у параметрі цементування, що створює складні співвідношення компонентів цементу, різні електрохімічні властивості зерен скелету породи та значну неоднорідність у поровому просторі. Тим самим ускладнюється визначення оптимального значення показника n у формулі Арчі.

Для порід з однорідним мінералогічним складом скелета породи (чисті пісковики, наприклад візейські пісковики ДДЗ із силікатним цементом), електропровідність описується двома компонентами і за формулою Арчі має вигляд:

$$\sigma_{нз} = K_n^m \cdot K_e^n \sigma_e, \quad (2)$$

де: σ_e – електропровідність пластової води, См/м;

K_n – коефіцієнт пористості, ч.од.;

K_e – коефіцієнт водонасичення, ч.од.;

$\sigma_{нз}$ – електропровідність нафтогазонасиченої породи, См/м.

Представлене емпіричне рівняння отримано за умови, що скелет породи має нескінченний електричний опір. Показник степеня m відображає узагальнену характеристику ступеня цементування породи, структуру і геометрію порового простору, а n відображає розподіл мінералізованої води у породі, змочуваність скелету та інші параметри.

Визначення параметрів m і n проводилось на колекції взірців, відібраних з продуктивного горизонту і досліджених у лабораторних умовах. Коли породи-колектори мають складну будову з макро- та мікро неоднорідностями, значення підрахункових параметрів матимуть низьку достовірність. Використання даних електрометрії свердловин під час підрахунку запасів призведе до похибки у визначенні коефіцієнта насичення.

Як видно, створювати емпіричні моделі для конкретних товщ сьогодні достатньо складно через малий об'єм відбору kernового матеріалу і обмежену кількістю лабораторних досліджень петрофізичних характеристик.

Використовуючи результати лабораторних вимірів петрофізичних параметрів ($\rho_n, P_n, \rho_e, K_n, K_{пр}, K_e, K_{e3}$) порід чистих пісковиків з Тимофіївського і Куличихинського родовищ, проведено дослідження відповідності моделі електропровідності Арчі до експериментально встановленої залежності. Колекторські властивості чистих пісковиків, які виповнюють продуктивні розриви свердловин досліджуваних родовищ, за лабораторними даними kernового матеріалу характеризуються значеннями пористості від 6% до 23%, проникності – від 0,3 мкм² до 2000 мкм² та більше. Пісковики тонко-, дрібно- та середньозернисті, слабко- та міцноцементовані, щільні, шаруваті, слюдисті, подекуди вапнисті. По площі пісковики пластів-колекторів невитримані, ущільнюються, переходячи у неколектори. Для даних колекторів розрахунки ρ_n^p проведено за формулою:

$$\rho_n^p = \rho_e \cdot K_n^{-m} \cdot K_e^{-n}. \quad (3)$$

Значення опору води, що використовувалась для насичення взірців візейських відкладів, відповідає пластовій воді і дорівнює $\rho_e=0,015$ Ом. Показники степеня для залежностей $P_n=f(K_n)$, $P_n=f(K_e)$, що використовувались при підрахунку запасів на Тимофіївському родовищі, приймалися: $m=1,93$, $n=1,72$.

Проведені дослідження дозволили зіставити експериментальні і розрахункові значення електричного опору породи. Зіставлення проводилось у два етапи: спочатку встановлювався зв'язок розрахованих і вимірених значень електричного опору при умові, що $K_e=K_{e3}$, тобто включались тільки значення опору із мінімально можливою залишковою водою. Другий етап передбачав ці ж самі роботи, але вже при частковому насиченні породи. Результати досліджень параметрів, що характеризують ці зв'язки, збігаються. Встановлений зв'язок характеризується відносно невисоким коефіцієнтом кореляції – $R=0,81$. У діапазоні великих значень електричного опору спостерігається значна

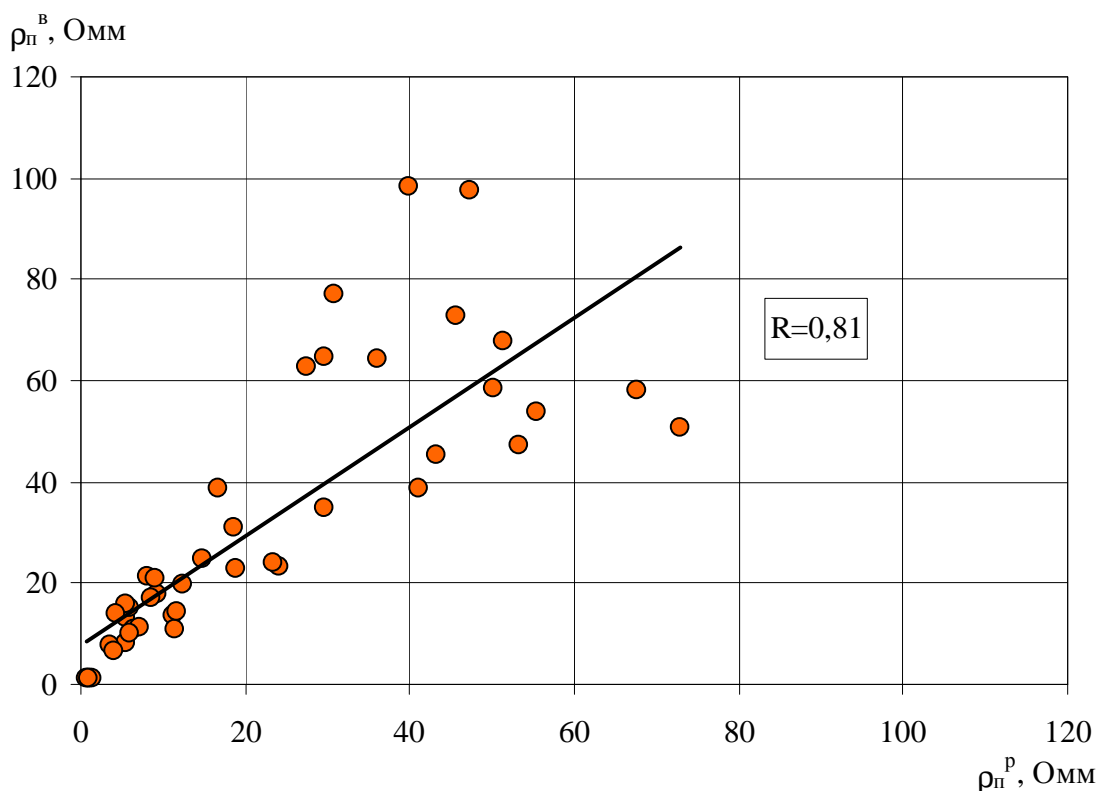


Рисунок 1 – Зіставлення питомого електричного опору ρ_n^B , виміряного на взірцях керну в лабораторних умовах, із розрахованими значеннями ρ_n^P (з врахуванням встановлених залежностей $P_n=f(K_n)$, $P_n=f(K_v)$, що охарактеризовані малими значеннями структурних показників n і m)

розбіжність точок, що, на нашу думку, підтверджує неоднорідність структурної будови гірських порід.

Спроби оптимізувати значення показників степеня m і n не призвело до збільшення коефіцієнта кореляції (рис. 1, $R=0,81$), тобто зміна величини показників степеня не зменшує розбіжності точок. Такий зв'язок вказує на те, що до колекції входять взірці гірських порід з неоднорідною будовою структури порового простору.

Виходячи із наведеного вище, нами проведено оцінювання і розподіл цих неоднорідностей на різні генеральні сукупності за геолого-геофізичними параметрами. До основних фізичних властивостей порід-колекторів нафтогазових покладів відносяться: об'єм порового простору, особливості взаємозв'язку рідинних фаз, які насичують пори; структура порового простору породи; властивості мінерального скелету. За визначенням Ханіна А.А., Енгельгарда В. [11, 12] структура порового простору колектора є функцією питомої поверхні і геометрії пор. Таким чином, взаємозв'язок фізичних властивостей порід-колекторів заданого геологічного об'єкта буде зумовлений, в основному, структурою порового простору. Слід зазначити, що пористість і питома поверхня мають чітку фізичну суть, і їх кількісні характеристики можна визначати експериментально як на керновому матеріалі, так і геофізичними методами дослідження свердловин. Дослідження кількісної

оцінки геометрії пор у лабораторних умовах пов'язано зі значними економічними та технологічними проблемами (метод ртутної порометрії тощо).

Багато наукових праць [13, 14] присвячені дослідженню структури порового простору, однак єдиного способу кількісної та якісної оцінки цього параметра не запропоновано. Можливість визначення параметра “структура порового простору” дозволить встановлювати залежності усіх фізичних властивостей порід-колекторів за даними пористості, питомої поверхні, геометрії пор і характеристик мінерального скелету. Тому вирішення проблеми оцінки структури порового простору є актуальною практичною задачею.

Структура порового простору гірських порід настільки складна і багатогранна, що визначення кількісних характеристик вимагає створення багатопараметричної моделі. Наприклад, поверхня порового простору може бути описана такими параметрами: формою поверхні, градієнтом нахилу поверхні, відстанню між точками дотику зерен скелету, формою уламків, формою каналу, звивистістю, об'ємом порового простору, питомою поверхнею тощо. Збільшення параметрів, які визначають структуру порового простору гірських порід, обумовлює невизначеність при її опису. Така постановка задачі зі встановлення параметричної оцінки структури порового простору значно ускладнює практичне визначення характеристик колекторів.

Розглянемо можливості уніфікованого комплексного підходу до оцінки параметра “структура порового простору”, який може об’єднати структуру і об’єм порового простору, діаметр пор, характеристику водонасичення та інші параметри.

Коефіцієнт водонасичення є одним із параметрів, який характеризує об’єм і структуру порового простору. Визначення коефіцієнта водонасичення колектора у лабораторних умовах проводиться методами капілярметрії. Криві капілярметрії вказують на розподіл коефіцієнта водонасичення від тиску і відображають структуру порового простору та особливості геометрії пор. Зв’язок залишкового водонасичення із структурою порового простору описується залежністю встановленою М. Левереттом у 1941 р., яка враховує фізичні властивості породи і рідини, що насичує колектор:

$$J(K_e) = \frac{P_k}{\sigma \cos \Theta} \sqrt{\frac{K_{np}}{K_n}}, \quad (4)$$

де: P_k – капілярний тиск, Па;
 σ – поверхневий натяг, $\times 10^{-3}$ Н/м.

В роботі Шейдегера А.Е. [15] показано, що функція М. Леверетта є універсальною характеристикою структури порового простору. Встановлено, що залежності $K_{e3} = J((P_k / \sigma \cos \Theta) \sqrt{K_{np} / K_n})$ для різних продуктивних горизонтів характеризуються власними значеннями $J(K_e)$ – функції для конкретного геологічного району, тобто залежність описує емнісно-фільтраційні властивості колектора з врахуванням структури порового простору.

Для зручної кількісної інтерпретації кривих капілярметрії і врахування параметрів зв’язку залишкового водонасичення з тиском початку вилучення рідини із капілярів Дж. Томіром [14] запропоновано описувати залежність (2.4) гіперболою в логарифмічних координатах:

$$\ln\left(\frac{1-K_e}{1-K_{e3}}\right) = -\chi \ln \frac{P_k}{P_0}, \quad (5)$$

де: $(1-K_e)$ – відносний об’єм пор, зайнятий нафтою за капілярного тиску P_k ;

$(1-K_{e3})$ – відносний об’єм пор, який зайнятий нафтою при нескінченному капілярному тиску;

P_0 – тиск початку витиснення рідини, Па;

χ – показник степеня гіперболи.

Альтернативною для визначення кривих капілярного тиску є методика центрифугування, яка дозволяє встановлювати зв’язок динаміки коефіцієнта водонасичення з електропровідністю колектора. У роботі Б.Ю. Вендельштейна, А.С. Горбенко [5, 16] показано, що цей метод порівняно з класичним методом напівпроникної мембрани дає високу ступінь збіжності результатів визначення K_{e3} .

У роботі проведені дослідження зв’язку зміни електричного опору породи з вмістом залишкової води при вилученні порової води з

колектора за умов зростання тиску. Виходячи з рівняння М. Леверетта (4), градієнт зміни залежності об’єму вилученої води від величини тиску, безпосередньо залежить від структури порового простору. Результати досліджень дадуть можливість отримати критерій для оцінки геологічних сукупностей за електричними властивостями і структурою порового простору, що дасть можливість оцінювати неоднорідність при встановленні залежності електричного опору та водонасичення.

Для дослідження зв’язку структури порового простору з функцією зміни електричного опору від вмісту залишкової води, використані результати вимірювань P_n і K_e , отримані методом центрифугування. Взірці керна описують візейські відклади з Куличихинського і Тимофіївського родовищ.

Розглянемо функцію $P_n = A/K_e^n$ і вивчимо зміну градієнта G у заданому діапазоні зміни аргументу K_e . Для кожного взірця, на якому проведено дослідження залежності електричного опору від вмісту води у поровому просторі, методом центрифугування розраховувалось значення G за відомою формулою $\Delta f(K_e)/\Delta K_e$. Нами вибрана ділянка зміни коефіцієнта залишкового водонасичення у межах (20÷70 %). Результати досліджень вказують на те що, зміна градієнта функції $P_n = A/K_e^n$ залежить від колекторських властивостей і структури порового простору. Характеристика емнісно-фільтраційних властивостей взірців за градієнтом зміни функції $P_n = f(K_e)$ при вилученні води дала підставу запропонувати новий підхід для створення моделі електропровідності чистих пісковиків, у якій враховується їхня структура порового простору.

Вище нами було вказано, що вибір параметрів n і m при зіставленні розрахованих значень ρ_n^p за моделлю Арчі і визначених у лабораторних умовах ρ_n^e мають значну розбіжність (рис. 1). У роботі [17] вказано, що n залежить від будови порового простору. Нами пропонується параметр n подавати, як $m \times \zeta(G)$. Функція $\zeta(G)$ – це нормована функція, що залежить від градієнта G , який, в свою чергу, є параметром, який залежить від структурної будови пор колектора. Тоді модель електропровідності матиме такий вигляд:

$$\rho_n^p = K_n^{-m \zeta(G)} K_e^{-n} \rho_e, \quad (6)$$

де G – градієнт функції $P_n = f(K_e)$.

Значення параметра n прийнято 2 ($n=2$).

На рисунку 2 наведено результати зіставлення значень ρ_n^p , розрахованих за формулою (6), із значеннями ρ_n^e , вимірними на кернавому матеріалі у лабораторних умовах. Встановлений зв’язок характеризується більшим коефіцієнтом кореляції $R=0,973$ у порівнянні із залежністю $\rho_n^e = f(\rho_n^p)$, представленою на рисунку 1. Спостерігається суттєве зменшення розбіжності значень електричного опору у діапазоні $K_e=4\div 15$ %. На високих значеннях K_e щільність точок збільшилась, але на меншу величину. Такий характер змін, враховуючи те, що K_e для розрахунків вибрано як залишкова вода, вказує

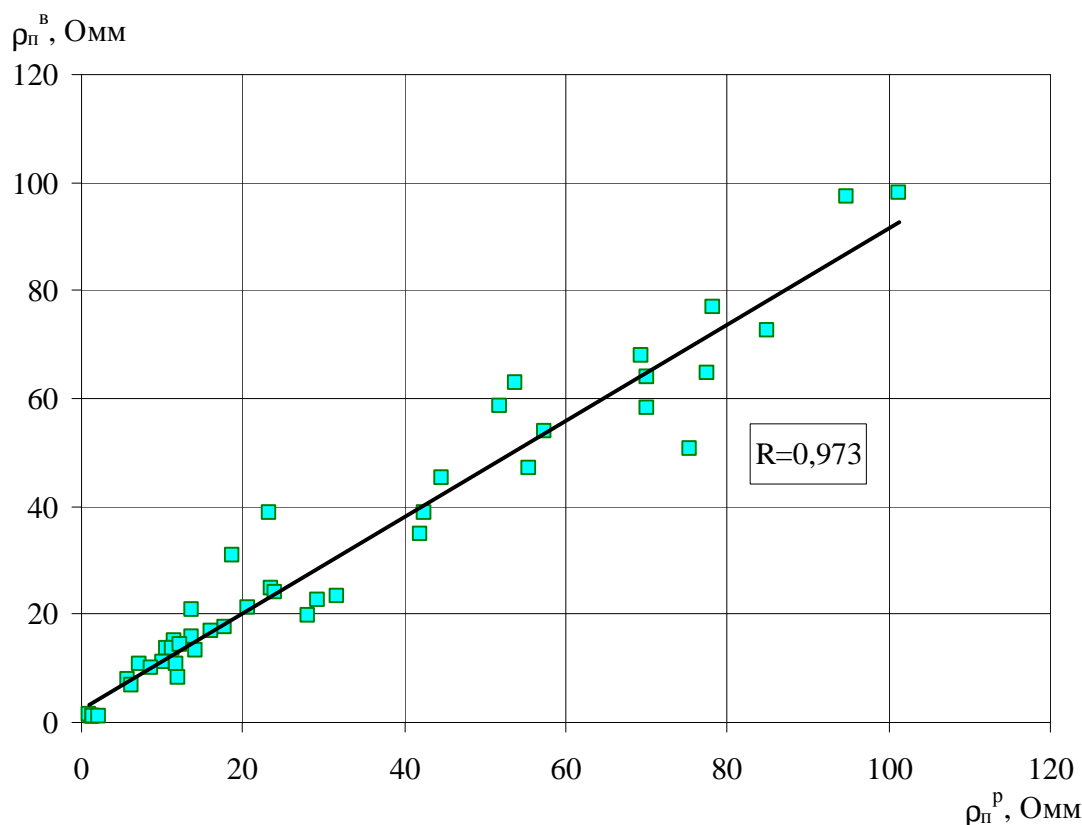


Рисунок 2 – Зіставлення питомого електричного опору ρ_n^e , виміряного на взірцях керну в лабораторних умовах, із розрахованими значеннями ρ_n^p (із врахуванням градієнта функції псевдокапілярметрії)

на домінуючий вплив структури порового простору на електричний опір породи і менший вплив кількості води для гранично насичених порід колекторів. Визначена величина K_{e3} шляхом витіснення води із пор породи максимально характеризує мікро- і макронеорідність структури порового простору. Градієнт, тобто швидкість вилучення води, залежить від діаметра пор, звивистості пор, об'єму порового простору, сполученості пор, кількості дрібно- і капілярних пор, співвідношення мікро- і макропор та інших властивостей. Використання параметра G , який несе інформацію про структуру порового простору гірських порід, виміряну у динамічному режимі, додає кількісну інформацію для опису колекторських властивостей, що зменшує невизначеність розв'язання задачі оцінки їх характеру насичення.

Отже, складна структура порового простору є основним чинником, що призводить до похибки у визначенні коефіцієнта насичення за даними методів електричного каротажу. Для врахування впливу складної будови структури порового простору на величину електропровідності, запропоновано новий підхід, для створення моделі електропровідності, в основі якої покладено врахування градієнта зміни функції $P_n=f(K_e)$. Ефективність запропонованого нами підходу підтверджена експериментальним моделювання фізичних параметрів визначених на керновому матеріалі.

Література

- 1 Кобранова В.Н. Физические свойства горных пород (петрофизика) / В.Н. Кобранова. – М.: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горнотопливной литературы, 1962. – 490 с.
- 2 Дахнов А.В. Исследование связей между физическими свойствами максимально влажных терригенных пород и их проницаемостью: автореф. дис. канд. геол.-мин. наук: 04.00.12 “Геология” / А.В. Дахнов; МИНХиГП. – М., 1975. – 21 с.
- 3 Элланский М.М. Петрофизические основы комплексной интерпретации данных ГДС: Методическое пособие / М.М. Элланский. – М.: ГЕРС, 2001. – 229 с.
- 4 Леонтьев Е.И. Моделирование в петрофизике / Е.И. Леонтьев. – М.: Недра, 1978. – 124с.
- 5 Вендельштейн Б.Ю. О связи между параметром пористости, коэффициентом поверхностной проводимости, диффузионно-адсорбционными свойствами терригенных пород / Б.Ю. Вендельштейн // Труды МИНХ и ГП. – М.: Гостоптехиздат, 1960. – № 31. – С. 16-30.
- 6 Нестерова Г.В. Математические модели электропроводности двухкомпонентных сред и формула Арчи (по материалам публикаций) / Г.В. Нестерова // НТВ Каротажник. 2008. – № 8(173). – С. 80 – 101.

- 7 Кнеллер Л.Е. Электрические, электромагнитные методы и программное обеспечение определения сопротивлений на основе моделирования / Кнеллер Л.Е., А.П. Потапов // Науч.-техн. вестник "Каротажник". – 2006. – №7-8 (148-149). – С. 160-173.
- 8 Определение глинистости по данным гамма-каротажа с учетом локальных геологических условий / Старостин В.А., Бардовский В.Я., Филатова Т.И. // Нефтяная промышленность сер. «Нефтегазовая геология и геофизика», экспр. инф. – 1987. – №11. – С. 14-18.
- 9 Карпенко А.Н. Петрофизические модели терригенных глинистых пород с учетом коэффициента слоистости глин / А.Н. Карпенко // Наук. вісник НГАУ. – 2001. – №5. – С. 14-16.
- 10 Изотова Т.С. Оценка пористости пород по кривых бокового микрокаротажа / Т.С. Изотова, А.О. Гриельская // Геология нефти и газа. – 1973. – №8. – С. 71-76.
- 11 Ханин А.А. Породы-коллекторы нефти и газа и их изучение / А.А. Ханин. – М.: Недра, 1969. – 368 с.
- 12 Энгельгард В. Поровое пространство осадочных пород / В. Энгельгард, пер. с немец. Геймана М.А. – М.: Недра, 1964. – 231 с.
- 13 Ромм Е.С. Структурные модели порового пространства горных пород / Е.С. Ромм. – Л.: Недра, 1985. – 240 с.
- 14 Иванов В.А. Структура порового пространства коллекторов нефти и газа / В.А. Иванов, В.Г. Храмов, Д.О. Дияров // Труд. КНИГНИ. – М.: Недра, 1974. – № 9. – 96 с.
- 15 Шейдеггер А.Э. Физика течения жидкости через пористые среды / А.Э. Шейдеггер. – М.: Гостехиздат, 1960. – 249 с.
- 16 Вендельштейн Б.Ю. Исследование связи между параметром насыщения и коэффициентом водонасыщения для полимиктовых песчанников и алевролитов месторождений Узень и Жетыбай : в кн. [Петрофизика и промысловая геофизика] / Б.Ю. Вендельштейн, А.С. Горбенко : Труды Моск. ин-та нефт. и газ. пром-сти. – М.: Недра, 1969. – № 89. – С. 33-40.
- 17 Нестерова Г.В. Математические модели электропроводности двухкомпонентных сред и формула Арчи (по материалам публикаций) / Г.В. Нестерова // НТВ Каротажник. – 2008. – №8(173). – С 80 – 101.

Стаття надійшла до редакційної колегії

21.11.11

Рекомендована до друку професором

Федоришиним Д.Д.