

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ГАЗОНАСИЧЕННЯ СКЛАДНОПОБУДОВАНИХ ПОРІД-КОЛЕКТОРІВ ШЛЯХОМ ПОБУДОВИ ІНДИВІДУАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ

Я.М. Коваль

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727123,  
e-mail: geophys@iung.edu.ua

Гірські породи, які представляють продуктивні горизонти багатьох нафтогазових родовищ України, характеризуються неоднорідністю мінерального складу скелета породи, а також вторинними процесами породоутворення і відносяться до складнобудованих порід-колекторів. До таких порід-колекторів відносяться поліміктові глинисті пісковики і породи-колектори із глинисто-карбонатним типом цементу. Основними чинниками, що призводять до похибки визначення підрахункових параметрів складнобудованих порід-колекторів, згідно з даними електричного каротажу, є складна структура порового простору, вміст глинистого і карбонатного матеріалу та ступінь пелітизації зерен скелету породи. З метою підвищення достовірності визначення підрахункових параметрів порід-колекторів, зокрема коефіцієнта газонасичення, пропонується проводити індивідуальне моделювання електропровідності гірських порід, яке дає можливість враховувати особливості будови конкретного геологічного об'єкта. Так, наприклад, для побудови моделі електропровідності поліміктових глинистих порід-колекторів за основу взято модель "двох вод" Б.Ю. Вендельштейна. Тому електропровідність поліміктових глинистих порід-колекторів складатиметься із суми електропровідностей чистого пісковика за моделлю Арчі та поліміктової і глинистої фракції. Результати зіставлення теоретичних розрахунків за створеною моделлю із фактичними даними підтвердили високу її ефективність.

Ключові слова: коефіцієнт газонасичення, глинисто-карбонатний тип цементу, модель електропровідності, електричний опір, пористість.

Горные породы, представляющие продуктивные горизонты многих нефтегазовых месторождений Украины, характеризуются неоднородностью минерального состава скелета породы, а также вторичными процессами породообразования и относятся к сложнопостроенным породам-коллекторам. К таким породам-коллекторам относятся полимиктовые глинистые песчаники и породы-коллектора с глинисто-карбонатным типом цемента. Основными факторами, которые приводят к погрешности определения подсчетных параметров сложнопостроенных пород-коллекторов, по данным электрического каротажа является сложная структура порового пространства, содержание глинистого и карбонатного материала и степень пелитизации зерен скелета породы. С целью повышения достоверности определения подсчетных параметров пород-коллекторов, в частности коэффициента газонасыщения, предлагается индивидуальное моделирование электропроводности горных пород, позволяющее учесть особенности строения конкретного геологического объекта. Так, например, в основу построения модели электропроводности полимиктовых глинистых пород-коллекторов положена модель "двоух вод" Б.Ю. Вендельштейна. Потому электропроводность полимиктовых глинистых пород-коллекторов будет состоять из суммы электропроводности чистого песчаника по модели Арчи, а также полимиктовой и глинистой фракций. Результаты сопоставления теоретических расчетов по созданной модели с фактическими данными подтвердили высокую ее эффективность.

Ключевые слова: коэффициент газонасыщения, глинисто-карбонатный тип цемента, модель электропроводности, электрическое сопротивление, пористость.

Rocks representing the pay horizons of many oil and gas fields in Ukraine are characterized by heterogeneity of the mineral composition of the skeleton rock and secondary rock-forming processes and refer to reservoir rocks with complicated structure. Such reservoir rocks are polymictic clayey sandstones and reservoir rocks of clay-carbonate type of cement. The main factors that lead to the error of determining the calculation parameters of reservoir rocks with complicated structure according to electric logging is the content of clay material and the degree of pelitization of rock skeletal grains. To improve the determination of calculation parameters reliability in reservoir rocks and in particular the coefficient of gas saturation it is proposed to take individual modeling of electrical conductivity of rocks, which makes it possible to take into account the structural features of a particular geological object. To construct the model of electrical conductivity of polymictic clay reservoir rocks the model of "two waters" by Vendelshtein B.Y. is taken as the basis one. Then, the electrical conductivity of polymictic clay reservoir rocks will consist of the amount of conductivity of pure sandstone by model of Archie and conductivity of polymictic and clay fractions. The results of the comparison of theoretical calculations according to the created model with actual data have confirmed the high level of its efficiency.

Key words: the coefficient of gas saturation, clay-carbonate type of cement, the model of electrical conductivity, electrical resistivity, porosity.

Геолого-геофізичні дослідження розрізів нафтогазових родовищ вказують на наявність значної кількості порід-колекторів з полімінеральним складом скелета породи, багатоконпонентним складом цементу матеріалу та складною будовою порового простору. В роботах [1, 2] породи-колектори поділяються на дві групи. До першої групи відносяться породи простої будови з мономінеральним складом матриці і однорідною структурою порового простору. До другої відносяться складнобудовані колектори, які характеризуються ущільненістю, значною шаруватістю, неоднорідністю за літологічним складом та пористістю, вторинною пористістю, складною структурою порового простору, значною глинистістю колектора, поліміктовим складом матриці [1, 2, 3, 4, 5]. До складнобудованих порід-колекторів із складною структурою порового простору відносять: поровотріщинуваті, порово-кавернозні, поровотріщинувато-кавернозні та чисто тріщинуваті колектори [1].

Часто до складнобудованих або просто складних колекторів відносять породи, які вміщують рухомі флюїди або газ, і звичайними способами інтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин виділяються нечітко або взагалі не виділяються на фоні порід, що їх вміщують. Це – слабо консолидовані теригенні породи, які залягають на невеликих глибинах, продуктивні породи-колектори з низьким електричним опором, теригенні або карбонатні товщі, тріщинуваті колектори.

Існуючі системи геофізичної інтерпретації тісно пов'язані з необхідністю петрофізичного моделювання нейтронних і електричних властивостей газонасичених порід-колекторів. Ці напрямки є основними для вирішення задачі підвищення ефективності визначення газонасичення продуктивних горизонтів. Для пластів-колекторів складної будови характерним є неадекватне відображення їх геологічних характеристик у фізичних полях, у зв'язку з чим визначені геофізичні параметри не завжди відповідають дійсним пластовим умовам. Існуючі методики визначення характеру насичення в цьому випадку не завжди є інформативними.

Нафтогазові родовища України характеризуються різними стадіями розробки. Існує велика кількість родовищ, де продуктивні поклади певною мірою обводнені, що може бути пов'язано як з підйомом міжфлюїдних контактів, так і нерівномірним вилученням вуглеводнів та проривом нагнітальних вод. Використання геофізичних методів дослідження свердловин на цьому етапі розроблення родовищ дозволяє визначати поточні коефіцієнти газонасичення пластів, що дає змогу запроектувати і застосувати заходи з підвищення ефективності вилучення газу.

Ефективність визначення поточного коефіцієнта газонасичення ( $K_2$ ) пластів значною мірою залежить від точності встановленої величини початкового газонасичення і положення газорідних контактів. Основними геофізичними методами, які застосовуються для вирі-

шення цієї задачі у відкритому стовбурі свердловин, є методи електрометрії. На результати електрометрії свердловин, окрім насичення пласта-колектора, суттєво впливає також компонентний склад струмопровідних мінералів матриці гірської породи.

Гірські породи, які виповнюють продуктивні горизонти багатьох нафтогазових родовищ України, характеризуються неоднорідністю мінерального складу скелету, а також наявністю вторинних процесів, які завершуються утворенням нових глинистих мінералів. Окрім цього, для такого типу порід властивий розподіл уламків гірських порід за розміром, що суттєво впливає на перетин і властивості поверхні порових каналів. Мінеральний склад скелету породи обумовлює також ступінь відсортованості зерен, їх форму і розмір. Більшість геологічних розрізів нафтогазових родовищ виповнені породами з поліміктовим складом скелету, які значною мірою є неоднорідними за будовою порового простору. Такий вид неоднорідності продуктивних товщ знижує інформативність та ефективність геолого-геофізичних досліджень, що в кінцевому варіанті призводить до похибки у визначенні коефіцієнта газонасичення. Тому проблема достовірного визначення коефіцієнта газонасичення є на сьогоднішній актуальною.

Розширення можливостей геофізичних методів для вирішення поставлених у роботі завдань можна здійснити в результаті використання сучасних технологій ГДС. У наш час для дослідження характеру насичення пластів-колекторів використовуються різні модифікації методів електричного і ядерно-геофізичних каротажів.

Питанню визначення початкового коефіцієнта насичення за інформацією електропровідності порід-колекторів насичених нафтою або газом, приділено багато уваги вченими В. Н. Дахновим, Б. Ю. Вендельштейном, В. М. Добриніним, М. Г. Латишевою, М. М. Еллінським та ін. Цими вченими запропоновано ряд методик, які дають змогу успішно вирішувати згадану вище задачу.

Достовірність визначення коефіцієнта насичення пластів-колекторів тісно пов'язана з якістю моделей електричних властивостей порід-колекторів. Наведемо основні фізичні уявлення про породу-колектор як провідник електричного струму. Порода-колектори гранулярної будови, які повністю насичені пластовою водою, характеризуються питомим електричним опором, який залежить як від питомого електричного опору пластової води  $\rho_w$ , так і від параметрів порового простору та мінерального складу матриці гірської породи. Питомий електричний опір пластової води залежить від концентрації і хімічного складу солей, які входять до складу розчину, та температури пласта. Питомий електричний опір більшості мінералів змінюється в широких межах – від  $10^{-6}$  до  $10^{15}$  Ом·м. Широкі межі зміни питомого електричного опору монокристалів і полікристалічних різновидностей пояснюється їх неоднорідністю, наявністю в них домішок. Наявність домішок

може змінити будову кристалічної ґратки мінералів, утворюючи в полікристалі мережу шляхів різної електропровідності. Для глинистих порід і порід складної будови питомий електричний опір залежить від співвідношення компонентів породи з різними електричними властивостями.

Результати вивчення геолого-фізичних параметрів гірських порід дають можливість створювати моделі пластів-колекторів для визначення їх колекторських властивостей за геофізичною інформацією. У своїй основі це – багатопараметрична і дуже складна задача, для розв'язання якої використовуються різні статистичні та аналітичні методи. Окрім цього, вирішення багатопараметричних задач значною мірою ускладнюють характеристики системи спостереження фізичного поля у свердловині, а також методичні аспекти проведення вимірювань.

Задача удосконалення системи інтерпретації геофізичної інформації у процесі дослідження геологічних характеристик порід-колекторів продуктивних покладів із складною будовою тісно пов'язане з необхідністю створення моделей досліджуваного середовища. Характеристика геологічного середовища проводиться на основі моделей – аналогів або моделей, побудованих за даними експериментальних досліджень, які визначають взаємозв'язки між параметрами фізичної і геологічної природи. Такі моделі і є основою проведення інтерпретації геофізичної інформації для одержання розв'язку геологічної задачі. Проблема розв'язання цієї задачі пов'язана з можливою невизначеністю зв'язку геологічних і фізичних параметрів. Геологічні характеристики не завжди відображаються у фізичному полі, параметри якого реєструють геофізичні вимірювальні прилади у свердловинах. Особливо така ситуація характерна для складнопобудованих порід-колекторів.

Модель середовища дає змогу досліджувати взаємозв'язки геологічних і фізичних параметрів породи-колектора. Модель, з одного боку, адаптує наші пізнання у вигляді системи рівнянь у реальну характеристику об'єкта, а, з іншого боку, представляє експериментальні дослідження у вигляді взаємо-замкненої системи об'єктивно існуючих законів, які характеризують геологічне середовище. Система рівнянь визначається параметричним описом геологічного об'єкта і допустимими межами розв'язання геологічної задачі.

Визначення колекторських властивостей гірських порід базується на моделюванні зв'язків між їх геофізичними і петрофізичними параметрами. Створенню геолого-геофізичних моделей присвячено багато наукових праць [6, 7, 8, 9, 10]. Моделі дозволяють прогнозувати властивості геологічного об'єкта за відсутності експериментальних спостережень і розраховувати значення геологічних параметрів за виміряною у свердловині інформацією геофізичних полів.

Створена геолого-геофізична модель повинна бути змістовною. Змістовність дозволяє розкривати причинно-наслідкові зв'язки у геологічних об'єктах, тобто отримувати нові наукові результати. Враховуючи те, що геологічні об'єкти є багатопараметричними складними системами, змістовні геолого-фізичні моделі повинні бути багатомірними. Багатомірні моделі у нафтогазовій геології є імовірними. Це пояснюється наступними міркуваннями:

– дуже складно виміряти всі параметри середовища для вивчення закономірностей у складнопобудованих системах, а моделі, які не включають всі існуючі параметри відносяться до імовірних;

– у вибраній моделі ми використовуємо оптимально наближений математичний опис, і тим самим, вносимо похибку апроксимації;

– можливі похибки оцінки вимірюваних параметрів моделі, що обумовлюється статистичним підходом до оцінки величини параметрів;

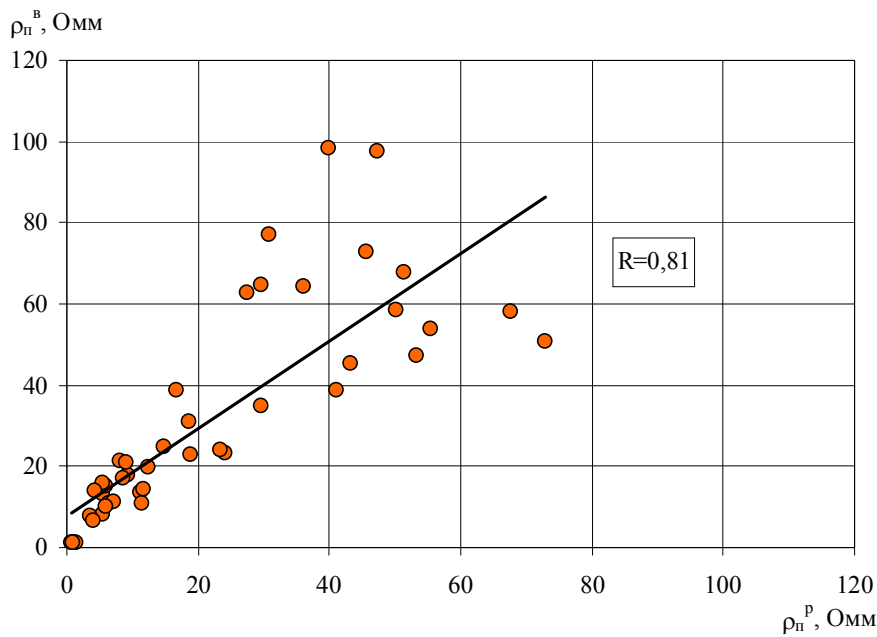
– похибка виникає при використанні характеристик об'єктів різних рівнів дослідження.

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 неоднорідною будовою скелета породи, дає змогу встановити діапазон дії залежностей фізичних параметрів і вивчити їх співвідношення.

При моделюванні необхідно, щоб модельні побудови відповідали реальному відображенню експериментально отриманих геолого-геофізичних параметрів. Умова відповідності модельних побудов, тобто заміна 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 наявності 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.

Достовірна модель дозволяє будувати та використовувати залежності при розв'язанні практичних задач з підрахунку запасів і контролю за розробкою нафтових та газових родовищ. Для збільшення достовірності багатопараметричної геолого-фізичної моделі, нами пропонується будувати індивідуальні моделі електропровідності для конкретних геологічних умов, використовуючи дані про емнісності-фільтраційні властивості порід-колекторів та їх літолого-петрографічну характеристику. Адже характеристика мінерального складу скелета породи і цементу визначає структуру порового простору порід-колекторів досліджуваного родовища.

Отже, основною метою даної роботи є запропонувати новий підхід до визначення достовірного значення початкового коефіцієнта



**Рисунок 1 – Зіставлення питомого електричного опору  $\rho_n^B$ , виміряного на взірцях керна в лабораторних умовах, із розрахованими значеннями  $\rho_n^P$  (з врахуванням встановлених залежностей  $P_n=f(K_n)$ ,  $P_n=f(K_6)$ , що охарактеризовані малими значеннями структурних показників  $n$  і  $m$ )**

газонасичення складнобудованих порід-колекторів.

Виходячи з результатів досліджень [6, 8, 9, 11] зв'язків фізичних і геологічних параметрів продуктивних відкладів, у загальному модель електропровідності породи-колектора можна представити наступною функцією:

$$\sigma_n = f(\sigma_1, \sigma_2 \dots \sigma_i, \xi_1, \xi_2 \dots \xi_n, g, r_{nop}, d_{зер} \dots C), (1)$$

де  $\sigma_n$  – питома електропровідність породи, См/м;

$\sigma_i$  – питома електропровідність компонентів, які складають породу, См/м;

$\xi_i$  – частка компонент, з яких складається скелет породи, ч.од.;

$g$  – геометрія порового простору;

$r_{nop}$  – радіус пор, мм;

$d_{зер}$  – діаметр зерен скелету породи, мм;

$C$  – ступінь упаковки зерен скелету породи.

На базі цієї функції розглянемо особливості побудов індивідуальних моделей електропровідності на прикладі мономіктових неглинистих пісковиків Тимофіївського і Куличихинського газоконденсатних родовищ, поліміктових глинистих пісковиків Розпашнівського газоконденсатного родовища та порід-колекторів Богородчанського газового родовища із глинисто-карбонатним типом цементу.

У роботі Г.В. Нестерова [11] 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 по-

ровому 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 Тимофіївського і Куличихинського газоконденсатних родовищ із силікатним цементом), електропровідність опи-сється двома компонентами і за формулою Арчі має вигляд:

$$\sigma_{нз} = K_n^m \cdot K_6^n \sigma_6, (2)$$

де  $\sigma_6$  – електропровідність пластової води, См/м;

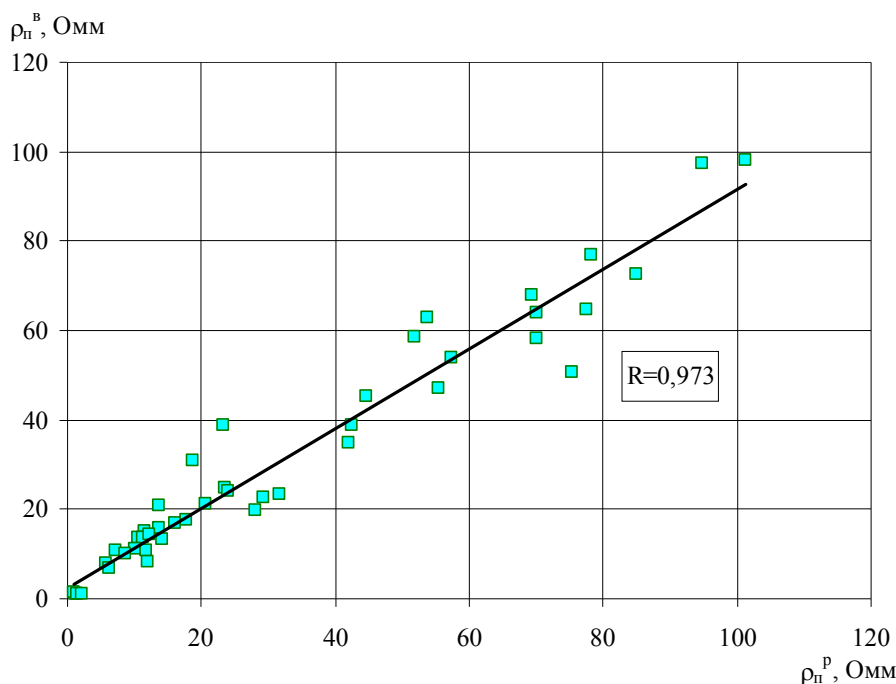
$K_n$  – коефіцієнт пористості, ч.од.;

$K_6$  – 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 породи, змочуваність скелету та інші параметри.

Використовуючи результати лабораторних вимірів петрофізичних параметрів ( $\rho_n$ ,  $P_n$ ,  $\rho_6$ ,  $K_n$ ,  $K_{np}$ ,  $K_6$ ,  $K_{6з}$ ) порід чистих пісковиків з Тимофіївського і Куличихинського родовищ, проведено дослідження відповідності моделі електропровідності Арчі до експериментально встановленої залежності [12]. Проведені дослідження дозволили зіставити експериментальні і розраховані значення електричного опору породи. Результати зіставлення показали, що встановлений зв'язок характеризується відносно невисоким коефіцієнтом кореляції –  $R=0,81$  (рис. 1).



**Рисунок 2 – Зіставлення питомого електричного опору  $\rho_n^e$ , виміряного на взірцях керна в лабораторних умовах, із розрахованими значеннями  $\rho_n^p$  (із врахуванням градієнта функції псевдокапілярметрії)**

У діапазоні великих значень електричного опору спостерігається значна розбіжність точок, що зумовлено неоднорідною структурною будовою порового простору гірських порід [13].

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 описі. Така постановка задачі зі встановлення параметричної оцінки структури порового простору значно ускладнює практичне визначення характеристик колекторів. 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. Для дослідження зв'язку структури порового простору з функцією зміни електричного опору від вмісту залишкової води, використовувались результати вимірювань  $P_n$  і  $K_{es}$ , отримані методом

центрифугування. Взірці керна описують візейські відклади з Куличихинського і Тимофіївського родовищ. Результати досліджень вказують на те що, зміна градієнта функції  $P_n=A/K_{es}^n$  залежить від колекторських властивостей і структури порового простору. Характеристика емнісно-фільтраційних властивостей взірців за градієнтом зміни функції  $P_n=f(K_{es})$  при вилученні води дала підставу запропонувати новий підхід для створення моделі електропровідності чистих пісковиків, у якій враховується структура їх порового простору.

У роботі [11] вказано, що  $n$  залежить від будови порового простору. Нами пропонується параметр  $n$  представляти 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 наступний вид:

$$\rho_n^p = K_n^{-m \zeta(G)} K_{es}^{-n} \rho_{es}, \quad (3)$$

де  $G$  – градієнт функції  $P_n=f(K_{es})$ .

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

На рисунку 2 наведено результати зіставлення значень  $\rho_n^p$ , розрахованих за формулою (6), із значеннями  $\rho_n^e$  виміряними на керовому 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. Визначена величина  $K_{es}$  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, сполуче-

ності 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 до створення моделі електропровідності, в основу якого покладено врахування градієнта зміни функції  $P_n = f(K_e)$ .

Велика кількість покладів вуглеводнів ДДЗ зосереджені у кам'яновугільних відкладах, які представлені як мономіктовими, так і поліміктовими породами-колекторами. У процесі обробки та інтерпретації результатів геофізичних досліджень свердловин, розрізи яких виповнені поліміктовими пісковиками, виникає багато труднощів, які пов'язані із невідповідністю зареєстрованих параметрів дійсним. У наступному це стосується методів електричного каротажу. Адже дуже часто пласти-колектори за даними електричного каротажу характеризуються як водоносні, а в результаті випробування із даних пластів отримують нафту чи газ. Дослідження такого типу колекторів і є актуальною проблемою визначення їх характеру насичення [11, 12, 13 та ін.]. У зв'язку з цим необхідно розробляти нові методичні підходи до інтерпретації результатів геофізичних досліджень відкладів такого типу.

Дослідженню електропровідності зв'язаної води приділялась велика увага багатьма вченими [14, 15 та ін.]. У роботі Е.І. Леонтьєва [15] електропровідність чистих пісковиків складається із електропровідності пухкозв'язаної і вільної води, які близькі за провідністю. У роботі [16] Б.Ю. Вендельштейном доведено, що присутність глинистого цементу у породі може призводити як до зменшення, так і до збільшення її питомого електричного опору. За умови  $\rho_e > \rho_{ш}$  присутність глини призводить до зменшення питомого електричного опору, а при  $\rho_e < \rho_{ш}$  заглинизованість викликає його збільшення.

Дані геофізичних досліджень свердловин електричними методами і результати промислових випробувань показали, що питомий електричний опір пласта зменшується зі збільшенням глинистості, що, в свою чергу, вказує на наявність першої умови –  $\rho_e > \rho_{ш}$ .

Для побудови моделі електропровідності порід складної будови нами за основу взято модель “двох вод” [10], яка передбачає, що електропровідність гірських порід зумовлена залишковою фізичнозв'язаною водою глинистої фракції породи та рухомою вільною водою. Електропровідність двох вод має різні значення,

тобто адсорбційнозв'язана вода має більшу електропровідність, ніж вільна пластова вода.

Нами досліджено природу електропровідності поліміктових глинистих порід за результатами досліджень геолого-геофізичних параметрів, проведених на керновому матеріалі відібраному із свердловин Розпашнівського газоконденсатного родовища [17].

Отже, у моделі двох вод електропровідність породи буде складатись із електропровідності електроліту на контакті дисперсної частини порового простору (глинисті мінерали, пелітизована поверхня зерен скелету породи) та електроліту, що заповнює порові канали.

У нашому випадку питома електропровідність поліміктових глинистих пісковиків для Розпашнівського газоконденсатного родовища буде складатись із суми електропровідностей чистого пісковика за моделлю Арчі та поліміктової і глинистої фракцій. Використовуючи формулу Арчі  $\sigma_{нз} = K_n^m \cdot K_e^n \sigma_e$  [12], нами пропонується модель електропровідності поліміктового глинистого пісковика записати у такому вигляді:

$$\sigma_n = K_n^{m \cdot \xi(G)} K_e^n \times \left[ \sigma_{en} \left( \frac{K_e - K_{e3}}{K_e} \right) + \sigma_{e.ad} \left( \frac{K_{e3}^{2l} + K_{e3}^{pl}}{K_e} \right) \right], \quad (4)$$

де  $\sigma_{en}$  – питома електропровідність порової води, См/м;

$\sigma_{e.ad}$  – питома електропровідність адсорбційної води, См/м;

$K_{e3}$  – залишкове водонасичення порового простору, ч.од.;

$K_{e3}^{2l}$  – залишкове водонасичення глинистої компоненти, ч.од.;

$K_{e3}^{pl}$  – залишкове водонасичення пелітизованої частини скелету породи, ч.од.

Коефіцієнт залишкового водонасичення для глинистої і пелітизованої фракції будемо визначати за формулами:

$$K_{e3}^{2l} = \frac{K_{2l} \cdot K_n^{2l}}{K_n(1 - K_n^{2l})}; \quad K_{e3}^{pl} = \frac{K_{pl} \cdot K_n^{pl}}{K_n(1 - K_n^{pl})}, \quad (5)$$

де  $K_{2l}$  – коефіцієнт глинистості, ч.од.;

$K_n^{2l}$  – коефіцієнт пористості глинистої фракції, ч.од.;

$K_{pl}$  – коефіцієнт поліміктовості, який характеризує ступінь пелітизації зерен скелету породи, ч.од.;

$K_n^{pl}$  – коефіцієнт пористості пелітизованої частини зерен скелету породи, ч.од.

На основі запропонованої формули моделі електропровідності (4) нами досліджено вплив ступеня пелітизації та глинистості пластів-колекторів на їх питомий електричний опір при визначенні коефіцієнта водонасичення. Результати досліджень [18] показали, що пелітизована частка скелету породи впливає більше на її питомий електричний опір при низьких значеннях коефіцієнта водонасичення. Тобто, у взірцях з максимальним газонасиченням при неврахуванні пелітизованої частки мінерального скеле-

та, похибка визначення  $K_c$  більша, що підтверджується фактичними даними. У діапазоні водонасичення  $K_g=40\div 70$  % вплив пелітизованої частки мінерального скелета мінімальний, тобто питомий електричний опір водонасичених порід в основному залежить від колекторських властивостей. Що стосується глинистості, то у діапазоні значень коефіцієнта водонасичення від 30% до 70% вплив глинистості на величину питомого електричного опору незначний. Залежність підпорядкована степеневій функції. При малій глинистості невеликі зміни водонасичення більше впливають на питомий електричний опір пласта.

Отже, наявність пелітизованих частинок у мінеральному скелеті поліміктових пластів-колекторів, які зв'язують велику кількість води, впливає на зниження питомого електричного опору газонасиченого пласта, що призводить до значних похибок у визначенні коефіцієнтів газонасичення на основі широковживаних моделей електропровідності гірських порід. Запропонована нами модель електропровідності дає можливість підвищити достовірність визначення питомого електричного опору порід-колекторів поліміктового складу, а в подальшому і коефіцієнта газонасичення.

Ще одним із важливих чинників, що впливає на достовірність визначення підрахункових параметрів порід-колекторів, є вміст в у них глинисто-карбонатного цементу. Залежно від пропорції глинистої і карбонатної компонент цементу породи, пласт-колектор характеризуються різним питомим електричним опором. Заміщення частки глинистої речовини цементу карбонатним домішком призводить до зменшення вмісту щільно зв'язаної води і, відповідно, збільшення питомого електричного опору [1, 3]. Тому визначення коефіцієнта газонасичення пластів-колекторів із переважаючим вмістом карбонатної речовини у цементі за даними електрометрії свердловин призводить до значних похибок.

Можливості урахування складу цементу гірських порід для визначення коефіцієнтів газонасичення пластів-колекторів є вкрай обмеженими, що пов'язано з малою кількістю досліджень керна матеріалу, а використання узагальнених моделей електропровідності ускладнено значною неоднорідністю цементної фракції у продуктивних породах.

Мною пропонується новий підхід до визначення коефіцієнта газонасичення порід-колекторів із глинисто-карбонатним цементом. Такого типу породи-колектори характерні для Богородчанського газового родовища. Для створення моделі електропровідності порід-колекторів з глинисто-карбонатним цементом нами взято за основу модель "двох вод". У 1960 р Вендельштейном Б.Ю. [16] запропонована модель електропровідності, в якій існує два провідника електричного струму – пластова вода та зв'язана вода (подвійний електричний шар). Пластова вода знаходиться у поровому просторі, а зв'язана вода присутня як адсорб-

ційна вода дисперсної частини породи. Дана модель має вигляд:

$$\frac{1}{\rho_{кан}} = \frac{Z_{uw}}{\rho_{uw}} + \frac{1 - Z_{uw}}{\rho_v}, \quad (6)$$

де  $\rho_{кан}$ ,  $\rho_v$  і  $\rho_{uw}$  – відповідно питомий електричний опір порового каналу, пластової води і подвійного електричного шару, Ом·м;

$Z_{uw}$  – частка порового каналу, зайнятого адсорбційною водою, ч.од.

Вендельштейном Б.Ю. доведено, що величина питомого електричного опору подвійного електричного шару не залежить від мінерального складу глинистої маси, а залежить від її структури.

При створенні моделі електропровідності порід-колекторів зроблено припущення про те, що подвійний електричний шар і адсорбційна вода на поверхні дисперсних частинок глинистої маси займають один і той самий об'єм:

$$Z_{uw} = \beta_{zл} = \frac{K_{zл} \cdot \omega_{zл}}{K_n}, \quad (7)$$

де  $\beta_{zл}$  – частка об'єму відкритих пор, зайнятих адсорбційною водою, ч.од.;

$\omega_{zл}$  – вміст адсорбційної води, ч.од.;

$K_{zл}$  – коефіцієнт об'ємної глинистості, ч.од.;

$K_n$  – коефіцієнт пористості, ч.од.

Оскільки подвійний електричний шар знаходиться у тому ж об'ємі, що і адсорбційна вода, то він і є провідником електричного струму.

Для порід-колекторів із глинисто-карбонатним цементом модель (7) набуде вигляду:

$$Z_{uw} = \beta_{zл} = \frac{K_{zл} \cdot \omega_{zл}}{K_n} + \frac{K_{дом} \cdot \gamma \cdot \omega_{дом}}{K_n}, \quad (8)$$

де  $K_{дом}$  – вміст карбонатного домішку у цементі, ч.од.;

$\omega_{дом}$  – вміст адсорбційної води на поверхні карбонатного домішку, ч.од.;

$\gamma$  – коефіцієнт, який характеризує структурні особливості карбонатного домішку.

Враховуючи модель "двох вод" (6) і модель (8), для порід-колекторів із глинисто-карбонатним цементом нами запропонована така модель питомого електричного опору [19]:

$$\frac{\rho_n}{\rho_v} = \frac{1}{(K_n \cdot K_g)^m} \times \frac{1}{1 - \left( \frac{K_{zл} \cdot \omega_{zл}}{K_n \cdot K_g} + \frac{K_{дом} \cdot \gamma \cdot \omega_{дом}}{K_n \cdot K_g} \right) \cdot \left( 1 - \frac{\rho_{uw}}{\rho_v} \right)}, \quad (9)$$

де  $\rho_n$  – питомий електричний опір породи, Ом·м;

$\rho_v$  – питомий електричний опір пластової води, Ом·м;

$K_n$  – коефіцієнт пористості, ч.од.

$K_g$  – коефіцієнт водонасичення, ч.од.;

$m$  – структурний коефіцієнт, який характеризує будову порового простору досліджуваних порід-колекторів ( $m=1,29$ );

$K_{zл}$  – коефіцієнт об'ємної глинистості, ч.од.;



$\omega_{gl}$  – вміст адсорбційної води на поверхні глинистої речовини, ч.од.;

$K_{дом}$  – вміст карбонатного домішку у цементі, ч.од.;

$\omega_{дом}$  – вміст адсорбційної води на поверхні карбонатного домішку, ч.од.;

$\gamma$  – коефіцієнт, який характеризує структурні особливості карбонатного домішку;

$\rho_{ш}$  – питомий електричний опір подвійного електричного шару, Ом.

Такого роду модель описує вплив двокомпонентного цементу на питомий електричний опір породи-колектора. При зіставленні коефіцієнта газонасичення, визначеного за стандартною методикою, яку використовували для підрахунку запасів газу Богородчанського родовища, із значеннями  $K_g$ , визначеними за вище наведеною моделлю (9), встановлено, що величини відрізняються [19]. Так, наприклад, в інтервалі 1106,0-1109,1м, який характеризується високим вмістом карбонатної речовини у цементі, визначений за стандартною методикою коефіцієнт газонасичення становить 81%, а за запропонованою нами моделлю (7) –  $K_g=72\%$ , що вказує на значну похибку у визначенні  $K_g$  за методикою, яка не враховує речовинний склад цементу гірської породи.

Отже, як видно із вище поданого матеріалу, складна структура порового простору, полімінеральний склад скелета породи, глинистість та карбонатність є одними із найважливіших чинників, що призводять до похибки визначення початкового коефіцієнта газонасичення за даними електричних методів дослідження свердловин. Тому пропонується новий підхід до визначення початкового коефіцієнта газонасичення шляхом використання в кожному окремому випадку тієї чи іншої моделі електропровідності, що залежить від внутрішньої будови порового простору та мінералогічного складу порід-колекторів. В основу перспективи подальшої роботи буде покладено впровадження запропонованих нами індивідуальних моделей електропровідності у виробництво.

### **Література**

1 Вендельштейн Б. Ю. Методические рекомендации по определению подсчетных параметров залежей нефти и газа по материалам геофизических исследований скважин с привлечением результатов анализа керн, опробованной и испытанной продуктивных пластов / Б. Ю. Вендельштейн, В. Ф. Козьяр, Г. Г. Яценко. – Калинин: НПО “Союзпромгеофизика”, 1990. – 261 с.

2 Итенберг С. С. Интерпретация результатов каротажа сложных коллекторов [Текст] / С. С. Итенберг, Г. А. Шнурман. – М.: Недра, 1984. – 256 с.

3 Ильинский В. М. Геофизические исследования коллекторов сложного строения / В. М. Ильинский, Ю. А. Лимбергер. – М.: Недра, 1981. – 208 с.

4 Исследования в открытом стволе нефтяных и газовых скважин / Б. Ю. Вендельштейн, В. М. Ильинский, Ю. А. Лимбергер, З. К. Козина. – М.: Недра, 1984. – 230 с.

5 Итенберг С. С. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин / С. С. Итенберг. – М.: Недра, 1972. – 312 с.

6 Кобранова В. Н. Физические свойства горных пород (петрофизика) / В. Н. Кобранова. – М.: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горнотопливной литературы, 1962. – 490 с.

7 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.

8 Элланский М. М. Петрофизические связи и комплексная интерпретация данных промысловой геофизики / М. М. Элланский. – М.: Недра, 1978. – 215 с.

9 Старостин В. А. Визначення ефективної проникності колекторів за даними ГДС / В. А. Старостин, О. М. Карпенко // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 1994. – № 31. – С. 4-9.

10 Карпенко О. М. Статистична модель тонкошаруватого розрізу свердловини за даними ГДС / О. М. Карпенко, Д. Д. Федоришин // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. – № 2(7). – С. 44-49.

11 Нестерова Г. В. Математические модели электропроводности двухкомпонентных сред и формула Арчи (по материалам публикаций) / Г. В. Нестерова // НТВ Каротажник. – Тверь, 2008. – № 8(173). – С. 80 – 101.

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

13 Старостин В. А. Дослідження впливу структури порового простору на електропровідність гірських порід / В. А. Старостин, Я. М. Коваль // Нафтогазова енергетика: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції і виставки (м. Івано-Франківськ, 10-14 жовтня 2011 р). – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2011. – С. 8.

14 Элланский М. М. Петрофизические связи и комплексная интерпретация данных промысловой геофизики / М. М. Элланский. – М.: Недра, 1978. – 215 с.

15 Леонтьев Е. И. Моделирование в петрофизике / Е. И. Леонтьев. – М.: Недра, 1978. – 124 с.

16 Вендельштейн Б. Ю. О связи между параметром пористости, коэффициентом поверхностной проводимости, диффузионного-адсорбционными свойствами терригенных пород / Б. Ю. Вендельштейн // Труды МИНХ и ГП. – 1960. – № 31. – С. 16-30.



17 Анализ результатов геофизических исследований скважин Распашновского газоконденсатного месторождения и использование этих данных для обоснования коллекторов и величин подсчетных параметров / В.Н. Проскурняк, И.Н. Муляр, К.Ф. Кривоносова, Л.Н. Сиротика, Л.А. Кирпичев // Министерство геологии СССР объединение “Укргеофизика”. – Полтавская экспедиция по геофизическим исследованиям в скважинах. – Полтава, 1989 г. – С. 293.

18 Старостін В. А. Індивідуальне моделювання електропровідності поліміктових глинистих газонасичених пісковиків / В. А. Старостін, Я. М. Коваль, І. О. Федак // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2012. – № 3(33). – С. 38-45.

19 Старостін В. А. Особливості визначення коефіцієнта газонасичення пластів-колекторів із глинисто-карбонатним типом цементу / В. А. Старостін, Я. М. Коваль, І. О. Федак // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2013. – № 1(46). – С.58-65.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
09.09.13*

*Рекомендована до друку  
професором **Орловим О.О.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором **Максимчуком В.Ю.**  
(Карпатське відділення інституту геофізики  
ім. С.Суботіна НАН України, м. Львів)*