УДК 550.832:550.8.05

Створення капілярної моделі електропровідності порід-колекторів (геоелектрична модель трьох вод)

Кашуба Г.О.*[1]*, *hrygorii.kashuba@ugv.com.ua;*
Башкіров Г.Л.*[2]*, *heorhii.bashkirov@ugv.com.ua;*
Каралаш А.Р.*[2]*, *ORCID ID 0009-0004-9254-8141, andrii.karalash@ugv.com.ua;*
1 – АТ «Укргазвидобування», Київ, Україна
2 – Київське відділення УкрНДІгазу АТ«Укргазвидобування», Київ, Україна

У роботі запропоновано капілярну модель електропровідності теригенних порід-колекторів, що враховує роздільний внесок трьох видів води в поровому просторі: адсорбованої води на глинистій компоненті, зв'язаної (плівкової) води на поверхні мінеральних зерен та вільної (пластової) води. Модель ґрунтується на геометричній капілярній моделі проникності, у якій поровий канал представлено циліндром сталого гідравлічного радіуса, а товщина плівки зв'язаної води визначається із застосуванням *«коефіцієнта Кашуби»* – емпіричної константи, яка визначається як добуток граничних значень відкритої пористості та коефіцієнта газонасичення для конкретних стратиграфічних відкладів. На основі узгодження геометричної (капілярної) та електричної моделей отримано математичні моделі для питомого електричного опору породи ρ_{rock}, коефіцієнта відкритої пористості $K_{p\ o}$ та коефіцієнта газонасичення K_g. Наведено результати чисельного моделювання товщини шару зв'язаної води, його питомого опору та верифікації капілярної моделі на прикладі визначення коефіцієнта газонасичення за даними геофізичних досліджень у свердловинах (ГДС).

Ключові слова: ГЕО, капіляр, електрична модель трьох вод, петрофізика, газонасичення.

Development of a capillary model of electrical conductivity in reservoir rocks (A Three-Water Geoelectrical Model)

Kashuba Hryhorii*[1]*, *hrygorii.kashuba@ugv.com.ua;*
Bashkirov Heorhii*[2]*, *heorhii.bashkirov@ugv.com.ua;*
Karalash Andrii*[2]*, *ORCID ID 0009-0004-9254-8141, andrii.karalash@ugv.com.ua;*
1 – JSC«Ukrgasvydobuvannya», Kyiv, Ukraine
2 – Kyiv Department UkrNDIgas JSC«Ukrgasvydobuvannya», Kyiv, Ukraine

The study proposes a capillary model of electrical conductivity in siliciclastic reservoir rocks that accounts separately for the contributions of three types of water within the pore space: water adsorbed on clay minerals, bound (film) water on mineral grain surfaces, and free (formation) water. The model is based on a geometric capillary model is represented by a cylinder with a constant hydraulic radius. The thickness of the bound-water film is determined using the "*Kashuba coefficient*", an empirical constant defined as the product of the threshold values of open porosity and gas saturation for specific stratigraphic units. By reconciling the geometric (capillary) and electrical models, mathematical relationships are derived for rock electrical resistivity $\rho_{rock,}$ open porosity K_{po}, and gas saturation K_g. Results of numerical modeling of the thickness and electrical resistivity of the bound-water layer are represented, together with verification of the capillary model through gas saturation estimation from well-log data.

Key words: GEO, capillary, three-water electrical model, petrophysics, gas saturation.

Постановка проблеми. Традиційна інтерпретація даних електричного каротажу за формулами Арчі–Дахнова добре працює для чистих (неглинистих) колекторів, де провідність породи визначається виключно зв'язаною водою на поверхні зерен скелету породи та вільною пластовою водою в поровому просторі. Різні модифікації такого підходу базуються на моделюванні комбінацій провідності зв'язаної води на поверхні зерен скелету породи та вільної пластової води для визначення загальної провідності гірської породи та отримали назву електричної моделі двох вод. У теригенних колекторах з підвищеною глинистістю ситуація суттєво ускладнюється: частина порового простору зайнята зв'язаною водою на поверхні мінеральних зерен та адсорбованою водою на глинистих частках, електропровідність яких відрізняється від провідності вільної пластової води на порядок і більше. Ігнорування цього факту призводить до систематичних похибок при визначенні коефіцієнтів пористості та газонасичення за даними ГДС, а отже – до недостовірної оцінки запасів вуглеводнів.

Актуальність. Точність визначення коефіцієнтів пористості, глинистості та газонасичення за даними ГДС безпосередньо впливає на достовірність підрахунку запасів вуглеводнів, що подається до Державної комісії із запасів корисних копалин (ДКЗ). Для значної частини родовищ України продуктивними є саме глинисті теригенні колектори (зокрема відклади карбону), для яких класичні петрофізичні залежності потребують суттєвого уточнення. Актуальність роботи визначається необхідністю розробки геоелектричної моделі, яка: (а) базується на фізично прозорій капілярній моделі, а не лише на емпіричній кореляції; (б) використовує параметри, що реально можуть бути розраховані за стандартним комплексом лабораторних і промислово-геофізичних досліджень; (в) дозволяє визначати товщину плівки зв'язаної води, ефективну пористість, питомий електричний опір капіляра та коефіцієнт газонасичення. Це особливо важливо для об'єктів, де відсутній повний комплекс керна по досліджуваному інтервалу, і доводиться переносити параметри моделі з аналогічних за умовами формування розрізів.

Моделювання. Порода-колектор складається із матриці, що представлена зернами осадового матеріалу, пустотного простору між ними, який кількісно характеризується коефіцієнтом повної пористості (K_p) та системою капілярів, що утворюються пустотним простором (порами). Розглянемо проникність в газонасиченому колекторі, як таку, що визначається капіляром з радіусом r_n. Ілюстрація загальної моделі капіляра та його параметрів показана на рисунку 1. Продуктивна (газонасичена) порода-колектор характеризується коефіцієнтом заповнення пор та капілярів вуглеводнями і, у кількісному відношенні доля заповнення порово-капілярного простору, виражається як коефіцієнт нафтогазонасичення (K_g).

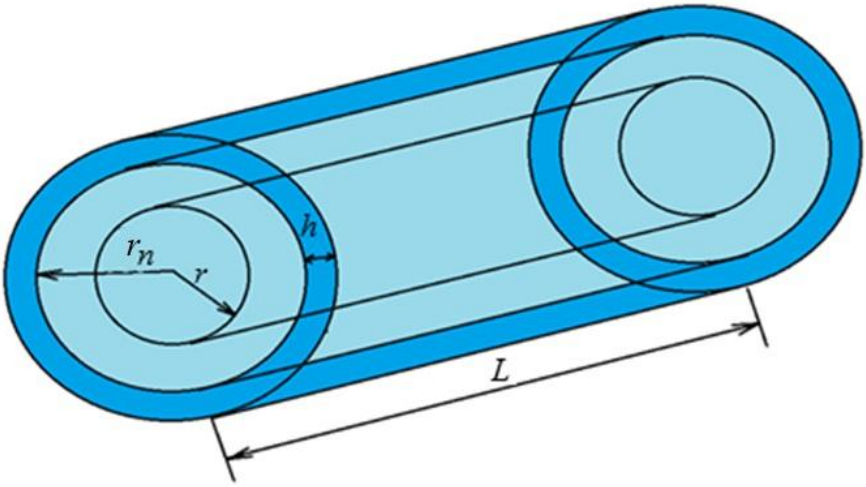

Рисунок 1 – Загальна модель капіляра

L – довжина капіляра;
h – товщина шару зв’язаної води (рихло- та міцнозв’язана);
r_n – радіус капіляра, що утворюється порами, через який може відбуватися рух флюїду;
r – гідравлічний радіус.

Із представленої моделі породи-колектора, очевидно, що її проникність, а отже практично всі геофізичні параметри (питомий електричний опір (ПЕО), інтервальний час розповсюдження поздовжньої хвилі (ΔT), інтенсивність вторинних ядерних полів і т.д.) напряму залежать від радіусу капіляра (r_n), що утворюється порами. Звичайно, що величина r_n є умовно змінною і з точки зору проникності визначається гідравлічним радіусом (r) $r= r_n/2$. Згідно з (Iheanacho et al., 2012), гідравлічний радіус r розраховується як:

$$r = \sqrt{\frac{K_{perm}}{K_{p\,ef}}}, \quad (1)$$

де K_{perm} – коефіцієнт проникності, $\cdot 10^{-15}$м^2;
$K_{p\,ef}$ – коефіцієнт ефективної пористість, ч.о.

Гідравлічний радіус, як відомо, дорівнює відношенню площі порового каналу до його периметру, а поверхню S (сумарну поверхню порових каналів) можна записати як один із варіантів формули Козені-Кармана, яка встановлює залежність коефіцієнта проникності від пористості та питомої поверхні:

$$S = \frac{K_{p\,ef} \cdot \sqrt{K_{p\,ef}}}{\sqrt{2 \cdot K_{perm}}}, \tag{2}$$

Згідно проведених нами досліджень (Кашуба & Башкіров, 2024) для колекторів добуток граничних значень коефіцієнтів відкритої пористості ($K_{p\,o\,c}$) та нафтогазонасиченості ($K_{g\,c}$) є умовно постійною величиною для різних стратиграфічних відкладів (змінюється у дуже вузькому діапазоні $K_{p\,o\,c} \cdot K_{g\,c}$ =0,05 ÷ 0,055). Добуток $K_{p\,o\,c} \cdot K_{g\,c}$ при граничному насичені є не що інше як коефіцієнт ефективної пористості ($K_{p\,ef}$). Назвемо цю величину *"коефіцієнтом Кашуби"* (k). Використання коефіцієнту k (середнє значення 0,0525) дає можливість розрахувати товщину шару зв'язаної води. Таким чином знаючи граничне значення коефіцієнта відкритої пористості для колекторів певного геологічного віку, розраховується граничне значення коефіцієнта нафтогазонасичення. Згідно із запропонованою моделлю капілярної проникності, весь об'єм ефективної пористості, при граничних значеннях, заповнений вуглеводневою фазою, а отже для цього випадку можна розрахувати, приймаючи граничну проникність в $1{,}0 \cdot 10^{-15}$ м^2, питому поверхню капіляра (S)(2), величини гідравлічного радіусу (r)(1), радіусу порового капіляра ($r_n = 2 \cdot r$). Знаючи величину питомої поверхні та гідравлічного радіусу (r) не становить труднощів розрахувати об'єм шару зв'язаної води (V_{bw}) і довжину капіляру (L), що утворений порами:

$$V_{bw} = \frac{1}{8} \cdot \frac{\left(2 \cdot (1 - K_{sh}) \cdot \sqrt{\frac{K_{perm}}{K_{p\,ef}}} + h\right)^2 \cdot K_{p\,ef}^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{K_{perm}} \cdot (1 - K_{sh}) \cdot \sqrt{\frac{K_{perm}}{K_{p\,ef}}}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{(1 - K_{sh}) \cdot \sqrt{K_{perm}} \cdot \sqrt{K_{p\,ef}} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{\frac{K_{perm}}{K_{p\,ef}}}}, \tag{3}$$

де K_{sh} – коефіцієнт глинистості, ч.о.

$$L = \frac{1}{8} \cdot \frac{K_{p\,ef}^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{K_{perm}} \cdot \pi \cdot (1 - K_{sh}) \cdot \sqrt{\frac{K_{perm}}{K_{p\,ef}}}}, \tag{4}$$

Отже товщина шару зв'язаної води, враховуючи запропонований алгоритм, для умов граничних параметрів колекторів визначатиметься наступним чином:

$$h = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot r^2 - V_{bw}}{\pi \cdot L}} - 2 \cdot r \tag{5}$$

Для діапазону граничних відкритих пористостей, які фактично трапляються у теригенних колекторах, проведено чисельні розрахунки, які показали, що товщина шару зв'язаної води змінюється від 40 до 200 нм (рис. 2).

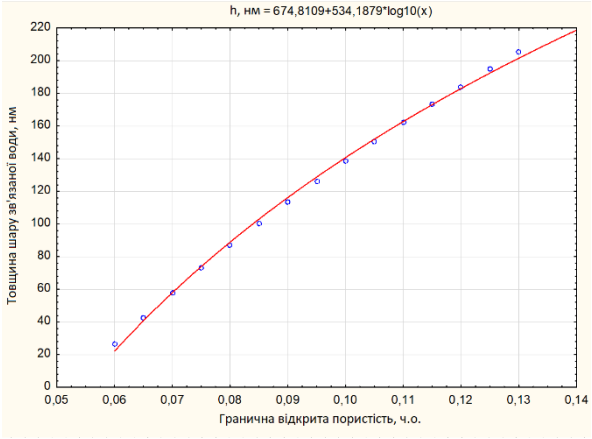

Рисунок 2 – Товщина шару зв'язаної води h залежно від величини граничної відкритої пористості $K_{p\,o\,c}$

Оскільки провідність шару зв'язаної води залежить від його товщини (через мінералізацію та структуру подвійного електричного шару на поверхні зерна), для подальших розрахунків r_n потрібна залежність осередненого питомого електричного опору зв'язаної води ρ_{bw} від товщини цього шару h, отримана за результатами лабораторних і промислово-геофізичних досліджень (рис. 3).

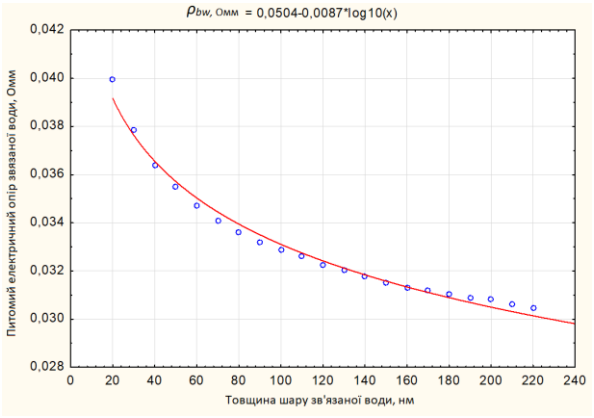

Рисунок 3 – Усереднений питомий електричний опір зв'язаної води ρ_{bw} залежно від товщини шару зв'язаної води h

На рисунку 4 наведено розширену капілярну модель водонасиченого колектора з ненульовим коефіцієнтом газонасичення (вільний газ показано червоним кольором).

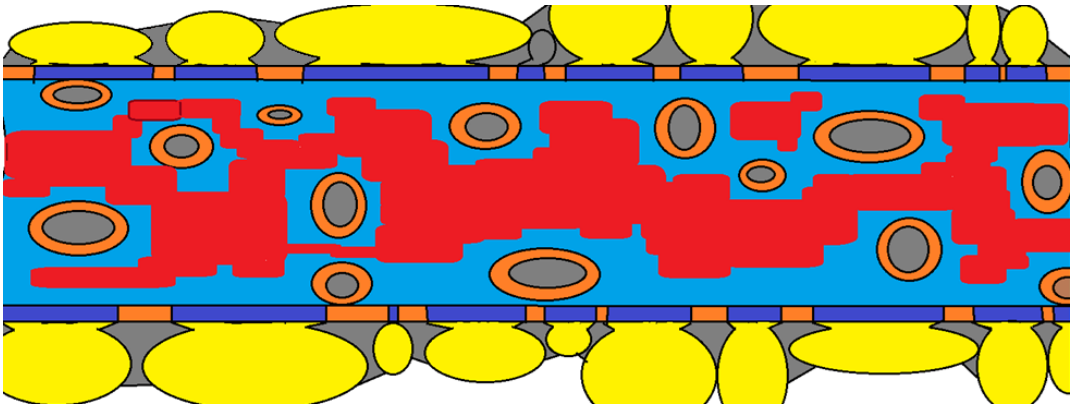

Рисунок 4 – Розширена капілярна модель водонасиченого колектора з ненульовим коефіцієнтом газонасичення

У запропонованій моделі капіляр являє собою циліндр сталого радіусу, але з стінками різної природи: матеріалу зерен породи та глини. На поверхні глини, що торкається до мінеральних зерен породи, відсутня тонка плівка зв’язаної води, є плівка адсорбованої води на глинистому цементі. Всередині капіляра – вільний флюїд (пластова вода і газ) та плівки адсорбованої води, які пов’язана з частинками глинистого матеріалу в поровому просторі очевидно паралельно будуть проводити струм. Таким чином, в капілярній геоелектричній моделі провідності можемо представити капіляр як три типи паралельно зв’язаних гілок:

- провідність послідовно зв'язані води (адсорбована на глині і зв’язана на поверхні зерен породи);
- провідність вільного флюїду (вільна вода, вільний газ);
- провідність адсорбованої води на поверхні дисперсних глинистих часток.

Капіляр у породі звивистий і займає частку об'єму від одиничного об'єму породи. Нехай об'ємна частка капіляра D_{cap} – це електрична пористість $K_{p\,el}$ породи. Тоді:

$$D_{cap} = K_{p\,el} \tag{6}$$

Частка скелету колектора:

$$D_{sk} = 1 - K_{p\,el} \tag{7}$$

Тут слід зауважити, що електрична пористість $K_{p\,el}$ є не що інше, як акустична пористість $K_{p\,dt}$.У породі капіляр зв'язаний паралельно з скелетом породи:

$$\frac{1}{r_n} = \frac{D_{cap}}{\rho_{cap}} + \frac{D_{sk}}{\rho_{sk}}, \tag{8}$$

де ρ_{cap} – питомий опір капіляра;

ρ_{sk} – питомий опір скелету породи.

Однак опір скелета наближається до нескінченості, тому:

$$\frac{1}{r_n} = \frac{D_{cap}}{\rho_{cap}} \tag{9}$$

або:

$$\frac{1}{r_n} = \frac{K_{p\,dt}}{\rho_{cap}}, \tag{10}$$

ρ_{cap} – це опір капіляра в одиничному об'ємі породи.

Опір породи буде:

$$\rho_n = \frac{\rho_{cap}}{K_{p\,dt}} \tag{11}$$

Якщо брати питомий опір капіляра ρ_{cap}, потрібно помножити його на величину (T), яка приводить його до об'єму електричної пористості:

$$\rho_n = \frac{\rho_{cap}}{K_{p\,dt}} \cdot T \tag{12}$$

Величина T є не що інше, як звивистість. Визначимо T:

$$T = \frac{r_n \cdot K_{p\,dt}}{\rho_{cap}} \tag{13}$$

З другого боку, за Арчі-Дахновим:

$$T = \sqrt{\frac{r_n}{\rho_w} \cdot K_{p\,dt}}, \tag{14}$$

де ρ_w – опір пластової води.

Прирівняємо ці дві формули:

$$\sqrt{\frac{r_n}{\rho_w} \cdot K_{p\,dt}} = \frac{r_n \cdot K_{p\,dt}}{\rho_{cap}} \tag{15}$$

Визначимо питомий електричний опір капіляра:

$$\rho_{cap} = \sqrt{r_n \cdot \rho_w \cdot K_{p\,dt}} \tag{16}$$

Розглянемо питомий опір капіляра з урахуванням моделі колектора (рисунок 4). Провідність капіляра визначається послідовно з'єднаними шарами адсорбованої води на глині у складі скелету породи і зв'язаної води на поверхні зерен порового простору, які паралельно знаходяться всередині порового простору:

$$\frac{1}{\rho_{cap}} = \frac{D_{abw}}{\frac{D_{ads} \cdot \rho_{ads}}{D_{abw}} + \frac{D_{bw} \cdot \rho_{bw}}{D_{abw}}} + \frac{D_{fw}}{\rho_w} + \frac{D_{adsin}}{\rho_{ads}}, \tag{17}$$

де D_{adsin} – частка адсорбованої води на глинистих частинках всередині порового простору;

D_{fw} – частка вільної води в поровому просторі, ч.о.;

D_{abw} – частка адсорбованої води на глині скелету та зв'язаної води на поверхні кварцових зерен скелету, ч.о.;

D_{ads} – частка частка адсорбованої води на глині скелету, ч.о.;

D_{bw} – частка зв'язаної води на поверхні кварцових зерен скелету, ч.о.;

ρ_{cap} – питомий електричний опір капіляра, Омм;

ρ_{ads} – питомий електричний опір адсорбованої води на глині скелету, Омм;

ρ_{bw} – питомий електричний опір зв'язаної води на поверхні кварцових зерен скелету, Омм.

За даними мікроскопічних досліджень типових теригенних колекторів, вміст глинистого матеріалу у складі скелету породи може сягати 5%. При подальшому зростанні загальної глинистості надлишок з'являється в поровому просторі у вигляді дисперсних часток. Згідно моделі Дахнова-Вендельштейна, коефіцієнт глинистості K_{sh}= 0,3 ч.о. є критичним для теригенних колекторів. Вважається, що при K_{sh} = 0,3 ч.о. практично весь первинний міжзерновий простір (який у чистого піску становить близько 30-40%) буде заповненим глиною. За прийнятою схемою, при $K_{sh} \leq$ 0,1 ч.о. глинистий матеріал вважається переважно «структурним» або цементувальним. При перевищенні 0,1 ч.о. надлишок глини починає переходити в дисперсний стан, заповнюючи пори породи. Якщо коефіцієнт глинистості K_{sh} перевищить орієнтовний рівень 0,3 - 0,4 ч.о., порода перетворюється на «глинистий матрикс», де піщані зерна вже не торкаються одне одного, а «плавають» у глині. Для наближеного опису зміни величини коефіцієнта глинистості в цементі породи використано модифікованою функцією гіперболічного типу:

$$K_{sh\ cm} \approx \frac{1}{1+\left(\frac{max(0;K_{sh}-0{,}048)}{0{,}075}\right)^{1{,}2}} \tag{18}$$

$$D_{adsin} = (1 - D_{glsk}) \cdot K_{sh} \cdot \omega \tag{19}$$

$$D_{ads} = D_{glsk} \cdot K_{sh} \cdot \omega \tag{20}$$

$$D_{fw} = K_{p\,o} \cdot \left(1 - K_g\right) - D_{bw} \tag{21}$$

$$D_{bw} = K_{p\,o} \cdot k_{bw} \tag{22}$$

$$D_{abw} = D_{ads} + D_{bw} \tag{23}$$

де $K_{p\,o}$– відкрита пористість, ч.о.;

K_g– коефіцієнт газонасичення, ч.о.;

K_{sh}– коефіцієнт глинистості, ч.о.;

k_{bw} –зв’язана вода в частках відкритій пористості;

ω – вміст адсорбованої води у частках об’єму глинистої компоненти, ч.о.

Прирівнявши вираз питомого електричного опору капіляра з рівняння (16) з виразом питомого електричного опору капіляра з рівняння (17), отримуємо:

$$\frac{1}{(r_n \cdot \rho_w \cdot K_{p\,dt})^{0.5}} = \frac{D_{abw}}{\frac{D_{ads} \cdot \rho_{ads}}{D_{abw}} + \frac{D_{bw} \cdot \rho_{bw}}{D_{abw}}} + \frac{D_{fw}}{\rho_w} + \frac{D_{adsin}}{\rho_{ads}} \tag{24}$$

Звідси отримуємо вираз для питомого електричного опору породи ρ_{rock}:

$$\rho_{rock} = \frac{1}{\left(\frac{D_{abw}}{\frac{D_{ads} \cdot \rho_{ads}}{D_{abw}} + \frac{D_{bw} \cdot \rho_{bw}}{D_{abw}}} + \frac{D_{fw}}{\rho_w} + \frac{D_{adsin}}{\rho_{ads}}\right)^{2.0} \cdot \rho_w \cdot K_{p\,dt}} \tag{25}$$

З отриманого рівняння визначаємо відкриту пористість $K_{p\,o}$:

$$K_{p\,o} = \frac{1}{\left(\frac{D_{abw}}{\frac{D_{ads} \cdot \rho_{ads}}{D_{abw}} + \frac{D_{bw} \cdot \rho_{bw}}{D_{abw}}} + \frac{D_{fw}}{\rho_w} + \frac{D_{adsin}}{\rho_{ads}}\right)^{2.0} \cdot \rho_w \cdot \rho_{rock}} - K_{sh} \cdot \omega \tag{26}$$

А також коефіцієнт газонасичення K_g:

$$K_g = 1 - \frac{(K_{p\,dt} - K_{sh} \cdot \omega) \cdot k_{bw} - \left(\frac{D_{adsin}}{\rho_{ads}} + \frac{D_{abw}}{\frac{D_{ads} \cdot \rho_{ads}}{D_{abw}} + \frac{D_{bw} \cdot \rho_{bw}}{D_{abw}}} - \frac{1}{(\rho_{rock} \cdot \rho_w \cdot K_{p\,dt})^{0.5}}\right) \cdot \rho_w}{Kn^{AK} - K_{sh} \cdot \omega} \tag{27}$$

Питомий опір адсорбованої води на глинистій компоненті (Элланский, 2001) при мінералізації пластової води понад 50 г/л є практично сталою величиною і становить 0,22 Омм; уводиться лише температурна поправка.

Практичні зауваження щодо застосування отриманих зв’язків (25 - 27): товщина плівки зв'язаної води та її питомий електричний опір розраховуються на підставі граничної пористості, яка визначається за графіком «проникність – відкрита пористість» у білогарифмічному масштабі; за відсутності такого графіка використовуються константи, властиві теригенним відкладам певного стратиграфічного віку; питомий електричний опір

адсорбованої води на глинистій компоненті є сталою величиною (з поправкою за температуру); у моделі відсутні додаткові підгінні коефіцієнти – є лише показник степеня «2,0» з формули Дахнова–Арчі для капіляра; цей показник розрахований для слабоглинистих колекторів і не враховує товщину плівки зв'язаної води та коефіцієнт газонасичення. У реальності його значення може перебувати в межах від 1,8 до 3,5.

Запропонована геоелектрична модель реалізована у вигляді програмного модуля інтерпретації ГДС для оперативного розрахунку $K_{p\ ef}$, K_g по розрізу свердловини на основі комплексу ГДС (електричні, акустичні, радіоактивні методи).

Висновки. Розроблено капілярну модель електропровідності теригенного колектора, яка розділяє внесок трьох типів пластової води – адсорбованої на глинистій компоненті, зв'язаної на поверхні мінеральних зерен і вільної – у сумарну провідність капіляра породи.

На основі «*коефіцієнта Кашуби*» (0,0525) та формул Козені–Кармана отримано розрахункову модель товщини шару зв'язаної води, чисельне моделювання показало діапазон значень *h* від 40 до 200 нм залежно від граничної відкритої пористості колектора.

Модель верифікована на лабораторних даних гранулометричного та петрофізичного аналізу керна відкладів картамишської світи та візейського ярусу; отримано узгоджені залежності $K_{perm} = f(K_{p\ o})$, $K_{p\ ef} = f(K_{p\ o})$, коефіцієнта зв'язаної води та коефіцієнта вільного флюїду від відкритої й ефективної пористості.

Узгодження геометричної (капілярної) і електричної моделей дозволило її математично описати та отримати конкретні формули для визначення питомого електричного опору породи ρ_{rock} (25), коефіцієнта відкритої пористості $K_{p\ o}$ (26) та коефіцієнта газонасичення K_g (27).

Модель не містить додаткових підгінних коефіцієнтів, окрім показника степеня 2,0 (з формули Дахнова–Арчі), фізичний зміст якого потребує подальшого уточнення для колекторів з різною глинистістю та газонасиченням (діапазон 1,8–3,5).

Первинна апробація моделі (21-23) на реальних промислово-геофізичних даних показала добру збіжність розрахованих та реально зареєстрованих за даними ГДС ПЕО, що свідчить про практичну придатність моделі для уточнення підрахункових параметрів глинистих теригенних колекторів.

Список використаних джерел :

1. Элланский, М. М. (2001) Петрофизические основы комплексной интерпретации данных ГДС (Методическое пособие). ГЕРС.

2. Iheanacho, P.C., Tiab, D., & Igbokoyi, A. O. (2012). Vertical-Horizontal Permeability Relationships for Sandstone Reservoirs. In Nigeria Annual International Conference and Exhibition (Paper SPE 163011-MS). Society of Petroleum Engineers. https://doi.org/10.2118/163011-MS

3. Кашуба, Г.О., & Башкіров, Г.Л. (2024). До питання з визначення граничних значень петрофізичних параметрів. Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування: Матеріали дев'ятої міжнародно- науково практичної конференції (с. 131—137). Державна комісія України по запасах корисних копалин. https://conf.dkz.gov.ua/files/2024_materials_net.pdf

References:

Ellanskiy, M. M. (2001). Petrofizicheskiye osnovy kompleksnoy interpretatsii dannykh GDS (metodicheskoye posobiye) M. M. Ellanskiy. – M. GERS. [In Russian]

Iheanacho, P.C., Tiab, D., & Igbokoyi, A. O. (2012). Vertical-Horizontal Permeability Relationships for Sandstone Reservoirs. In Nigeria Annual International Conference and Exhibition (Paper SPE 163011-MS). Society of Petroleum Engineers. https://doi.org/10.2118/163011-MS

Kashuba, H.O., & Bashkirov, H.L. (2024). Do pytannia z vyznachennia hranychnykh znachen petrofizychnykh parametriv. Nadrokorystuvannia v Ukraini. Perspektyvy investuvannia: Materialy deviatoi mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferencii (pp. 131-137). Derzhavna komisia Ukrainy po zapasakh koryshykh kopalyn. https://conf.dkz.gov.ua/files/2024_materials_net.pdf [In Ukrainian]