

Н. К. Парамонова

РОЛЬ РОЗТАШУВАННЯ КЕРАМІЧНИХ ЗОНДІВ ПІД ЧАС ВИВЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ "ВМІСТ — КАПІЛЯРНИЙ НАПІР" У ДВОФЛЮЇДНИХ СИСТЕМАХ

(Рекомендовано д-ром. геол.-мінерал. наук М. С. Огняником)

На основе экспериментальных исследований доказано, что метод Н. Е. Дзекунова получения измерений "содержание — капиллярный напор" в двухфлюидных системах с использованием вертикальных керамических зондов по всей высоте образца является достоверным для аппроксимации измерений зависимостью van Genuchten и определения параметров ${}^d\alpha$ и ${}^d\varepsilon$, которые характеризуют толщину в пределах высоты зонда.

Based on experimental research, it is demonstrated that Dzekunov method for measurements of "content — capillary head" in two-fluid systems using vertical ceramic cups along the full height of a sample is valid for approximation of measurements by van Genuchten function and determination of parameters ${}^d\alpha$ and ${}^d\varepsilon$, which characterize a layer within the height of a cup.

Постановка питання

Залежність "вміст — капілярний напір" застосовується для розрахунку вмісту змочуючого флюїду (води і нафтопродукту) в двофлюїдних системах "повітря — вода" (а — w) і "повітря — нафтопродукт" (а — о), а також води в системі "нафтопродукт — вода" (о — w). Вміст змочуючого флюїду визначається за капілярним напором з використанням функції van Genuchten (VG) залежно від напрямку насичення (дренування або убирання) [2]. Для основної гілки дренивання, коли відбувається дренивання змочуючого флюїду від повного його насичення, рівняння має вигляд:

$$\theta_j = (\theta_s - \theta_r) \left[1 + ({}^d\alpha h_{ij})^{d\varepsilon} \right]^{-d_m} + \theta_r, \quad (1)$$

де θ_j — об'ємний вміст змочуючої рідини; θ_s — повний об'ємний вміст флюїдів; θ_r — найменший залишковий вміст змочуючої рідини; ${}^d\alpha$, ${}^d\varepsilon$ — параметри рівняння, які одержуються апроксимацією лабораторних вимірів θ_j — h_{ij} ; $d_m = 1 - 1/{}^d\varepsilon$; h_{ij} — капілярний напір, який визначається як різниця вимірів напору незмочуючого флюїду ($i = a, o$) та змочуючої рідини ($j = w, o$): $h_{aw} = h_a - h_w$, $h_{ao} = h_a - h_o$, $h_{ow} = h_o - h_w$.

Для лабораторних вимірів θ_j і h_{ij} застосовується прилад М. Ю. Дзекунова, схему якого показано на рис. 1 [1]. В ньому для виміру напору змочуючої рідини використовується

керамічний зонд, який розташовується вертикально в межах всієї товщі міграції змочуючої рідини, що має різний ступінь насиченості, починаючи з повної. Виміри напору відносяться до середини зонду, а вміст змочуючої рідини осереднюється по всьому об'єму зразка:

$$\theta_j = \frac{V_{s,j} - V_{d,j}}{V}, \quad (2)$$

де $V_{s,j}$ — об'єм змочуючої рідини у насиченому зразку; $V_{d,j}$ — об'єм здренованої змочуючої рідини; V — об'єм зразка.

Правомірність такого осереднення не доведено, а тому достовірність параметрів ${}^d\alpha$ і ${}^d\varepsilon$ теж викликає сумнів. З метою доведення правомірності віднесення вимірних напорів до середини вертикального зонда, які характеризують осереднений вміст змочуючої рідини, а також достовірності визначення параметрів ${}^d\alpha$ і ${}^d\varepsilon$ було проведено експериментальні дослідження (виконавець Г. І. Голуб).

Експериментальні дослідження

В циліндр висотою 19 см, що був заповнений піском, насиченим водою до глибини 1,5 см, вмонтовано по вертикалі керамічні зонди: № 8 довжиною 17,5 см, середина якого припадала на глибину 10,25 см в інтервалі 1,5—19 см, та № 7 довжиною 6 см в інтервалі 1,5—7,5 см, середина якого знаходилась на глибині 4,5 см, а також шість

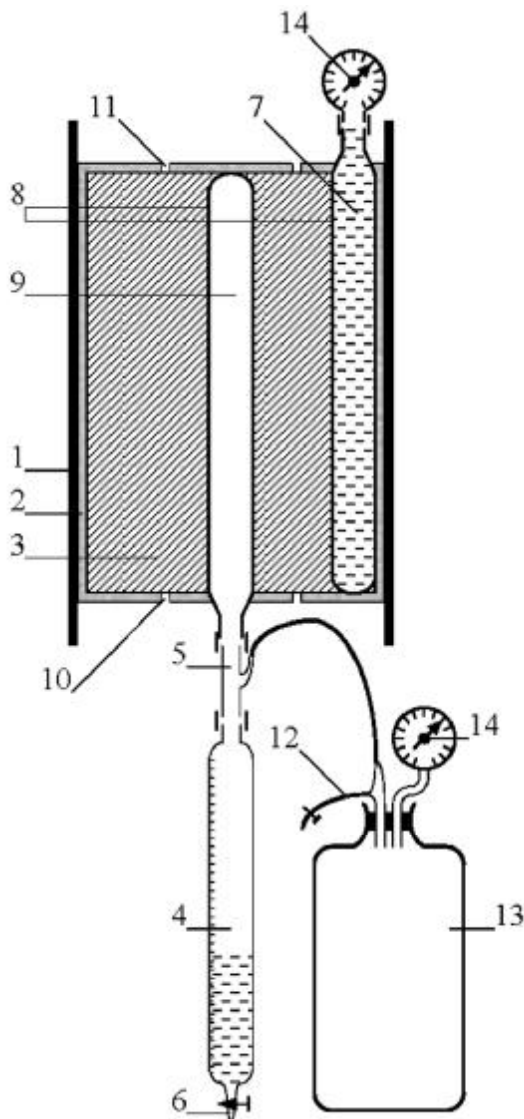


Рис. 1. Схема пристрою для визначення залежності "капілярний тиск — насиченість" при дренаванні (за методом М. Ю. Дзекунова)

1 — металева обійма; 2 — парафін; 3 — зразок ґрунту; 4 — мірна посудина; 5 — трійник; 6 — відгалуження для зливання води; 7 — тензіометр; 8 — зонди; 9 — камера негативного тиску; 10 — отвори для подачі води під час насичення зразка; 11 — отвори для зв'язку з атмосферним повітрям; 12 — відгалуження до насосу; 13 — ресивер; 14 — манометри

горизонтальних зондів, встановлених через 3 см на глибинах: № 1 — 1,5, № 2 — 4,5, № 3 — 7,5, № 4 — 10,5, № 5 — 13,5, № 6 — 16,5 см (рис. 2).

Об'єм піску становив $V = 2745 \text{ см}^3$, а об'єм води в ньому — $V_w = 980 \text{ см}^3$, що відповідає $\theta_s = 0,357$.

Було проведено фіксоване спускання води і вимір водяними манометрами напору води через керамічні зонди. Зниження рівня води

в циліндрі фіксувалось за допомогою п'єзометра. Всі дані вимірів наведені на рис. 3.

Обробка результатів експерименту

Для розрахунку прийнято дані про об'єм води в циліндрі та виміри напорів, які зафіксовані о 8-й годині 07.09.2009 р. і мали 2 доби для стабілізації.

На цей час із циліндра відібрано 150 см^3 води, а увійшло $26,42 \text{ см}^3$ за рахунок зниження рівня води в п'єзометрі і манометрах.

Застосовувались поліхлорвінілові трубки з внутрішнім діаметром $0,50 \text{ см}$, що зумовило площу перетину $0,196 \text{ см}^2$ і вхід води в циліндр при зниженні води в трубках: п'єзометр — $2,92 \text{ см}^3$ при $14,8 \text{ см}$; зонди: № 1 — $3,08$ при $15,7$; № 2 — $2,73$ при $13,9$; № 3 — $3,24$ при $16,5$; № 4 — $2,77$ при $14,1$; № 5 — $2,94$ при $15,0$; № 6 — $2,88$ при $14,7$; № 7 — $2,92$ при $14,8$; № 8 — $2,92 \text{ см}^3$ при $14,8 \text{ см}$. Всього у зразок увійшло $26,42 \text{ см}^3$ води.

Таким чином, у циліндрі стало $980 + 150 + 26,42 = 856,42 \text{ см}^3$ води, що зумовило середній вміст води:

$$\theta_w = V_w/V = 856,42 : 2745 = 0,312.$$

Зонд № 8 довжиною $17,5 \text{ см}$ контролює такий об'єм води (см^3):

$$0,312 \times 17,5 \times 144,474 = 788,83,$$

де $144,474 \text{ см}^3$ — об'єм піску по висоті 1 см циліндра.

Щоб одержати такий вміст ($0,312$) води при $h_{aw} = h_a - h_w = 0 - (-4,35 \text{ см}) = 4,35 \text{ см}$, віднесений до середини зонда ($10,25 \text{ см}$), за функцією VG необхідно, щоб $d_\alpha = 0,1567 \text{ 1/см}$ і $d_\varepsilon = 3,960$, а $m = 1 - 1/3,960 = 0,7475$.

$$\theta_w = (0,357 - 0,03) \left[1 + (0,1567 \times 4,35)^{3,960} \right]^{-0,7475} + 0,03 = 0,312.$$

Якщо вертикальний зонд вірно відображає параметри d_α і d_ε , то об'єм води, який відповідає розрахованому вмісту води і капілярному напору, що зафіксували горизонтальні тензіометри, повинен бути близьким до розрахованого за тензіометром № 8. Результати розрахунку за горизонтальними тензіометрами наведені в таблиці.

Як видно з таблиці, за вимірами горизонтальними тензіометрами загальний вміст води в циліндрі становить $796,24 \text{ см}^3$, що на $0,94\%$ більше від розрахунку за показниками зонда № 8 ($788,839 \text{ см}^3$).

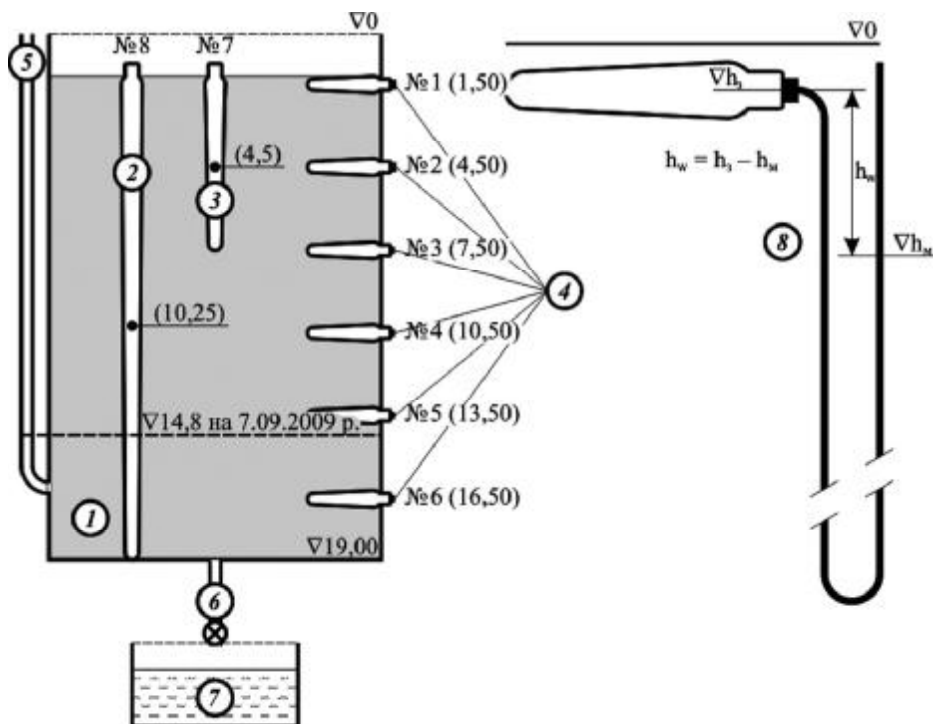


Рис. 2. Схема обладнання для вимірів напору води в ненасиченому пористому середовищі за допомогою вертикальних і горизонтальних керамічних зондів

1 — циліндр з піском; 2, 3 — вертикальні керамічні зонди (число в дужках — глибина середини зонду); 4 — шість горизонтальних керамічних зондів (число в дужках — глибина встановлення зонда); 5 — п'езометр; 6 — спускання води; 7 — мірна посудина; 8 — вимір напору води (h_w) у горизонтальному зонді водяним манометром: $h_w = h_s - h_m$ — глибина рівня води в манометрі, h_s — глибина встановлення зонда

Розрахунок об'єму води в циліндрі за вимірами горизонтальних тензіометрів

($\theta_s = 0,357$, $\theta_{w,r} = 0,03$, $d\alpha = 0,1567$ 1/см, $d\varepsilon = 3,960$, $d_m = 0,7475$)

Глибина, см	№ зонда	Капілярний напір ($h_{aw} = 0 - h_w$), см	Вміст води (θ_w), розрахований за рівнянням VG (1), частки од.	Розрахунки між точками виміру		
				Відстань (м), см	Осереднений вміст води ($\theta_{w,сep}$), частки од.	Об'єм води ($V_w = \theta_{w,сep} mF$), см ³
19—14,8	Насичена зона	6	0	4,2	0,357	216,624
				1,3	0,3568	67,02
13,5	Ненасичена зона	5	1,2	3,0	0,3474	150,58
10,5		4	3,4	3,0	0,3339	144,72
7,5		3	8,7	3,0	0,3095	134,13
4,5		2	9,2	3,0	0,1919	83,17
1,5		1	14			
						Σ 796,24

П р и м і т к а. Об'єм води в інтервалі 1,5—7,5 см — 217,3 см³ (134,13 + 83,17); $F = 144,474$ см² — площа циліндра.

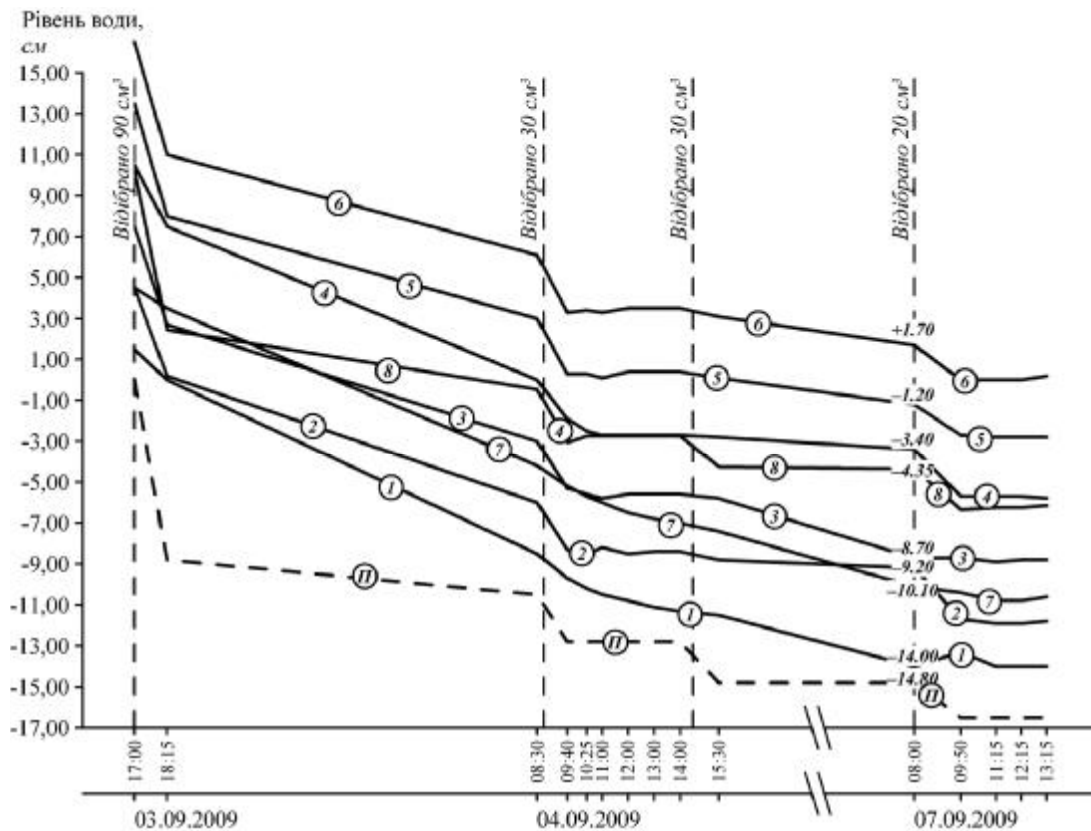


Рис. 3. Зміна у часі глибини рівня води в п'езометрі і напорів води в керамічних зондах в процесі відбору води з піску

П — глибина рівня в п'езометрі; 1–8 (у кружках) — напір води в керамічних зондах. Глибина встановлення зонда, см: 1 — 1,50; 2 — 4,50; 3 — 7,50; 4 — 10,50; 5 — 13,50; 6 — 16,50; 7 — 4,50 (сер); 8 — 10,25 (сер)

За вимірами вертикальним тензіометром № 7 ($h_{aw} = 10,1$ см)

$$\theta_w = (0,357 - 0,03) \left[1 + (0,1567 \times 10,1)^{3,960} \right]^{-0,7475} = 0,2296.$$

Він контролює об'єм води в інтервалі 1,5—7,5 см:

$$0,2296 \times 6 \times 144,474 = 199,03 \text{ см}^3.$$

Цей інтервал (1,5—7,5 см) також контролюється горизонтальними тензіометрами № 1—3, за якими оцінено об'єм води в ньому в $217,3 \text{ см}^3$ (див. таблицю). Таким чином, розрахунок об'єму води за вертикальним тензіометром № 7 відрізняється від розрахунку за горизонтальними тензіометрами № 1—3 на 9,2%.

Висновки

Виявлені розбіжності (0,92% і 9,2%) розрахованих об'ємів води у зразку за капілярними напорами, вимірними за допомогою верти-

кальних і горизонтальних зондів, є незначними для експериментальних досліджень.

Одержання вимірів $\theta_w - h_{aw}$ за методом М. Ю. Дзекунова з використанням вертикальних керамічних зондів на всю висоту зразка і віднесення їх до середини зонда є достовірним для апроксимації вимірів рівнянням VG та визначення його параметрів d_α і d_ε , які характеризують товщу зразка в межах висоти зонда.

1. Дзекунов Н. Е., Жернов И. Е., Файбишенко Б. А. Термодинамические методы изучения водного режима зоны аэрации. — М.: Недра, 1987. — 177 с.
2. Огняник М. С., Парамонова Н. К., Брикс А. Л. и др. Основы изучения загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами. — Киев: [А.П.Н.], 2006. — 278 с.

Ін-т геол. наук НАН України,
Київ
E-mail: gwp_ign@gwp.org.ua

Стаття надійшла
05.01.10