

А. Ю. Кетов, С. Т. Звольський, М. С. Бондаренко, О. В. Іваненко

## Інтерпретаційні залежності для нейтронних вологомірів з урахуванням щільності ґрунту

(Представлено членом-кореспондентом НАН України О. Ю. Митропольським)

Запропоновано новий підхід до врахування впливу щільності скелета ґрунту на показання нейтронних вологомірів при визначенні вологості ґрунту.

Нейтрон-нейтронний метод визначення об'ємної вологості ґрунту широко використовується в інженерно-геологічних, агроеліоративних та екологічних дослідженнях. Фізичною передумовою розв'язання цієї задачі є тісна залежність показань нейтронних вологомірів від вологості ґрунту, а методико-інтерпретаційною — експериментально чи розрахунково встановлена залежність показань нейтронного вологоміра (частіше у вигляді швидкості лічби нейтронів ( $I$ ), що провзаємодіяли з ґрунтом) від об'ємної вологості ґрунту ( $W_V$ ).

Інтерпретація показань нейтронних вологомірів у ґрунтах є досить складною задачею [1–3]. Показання приладів залежать не лише від вологості, а й від щільності скелета ґрунту ( $\rho_{ск}$ ), вмісту аномальних поглиначів нейтронів, хімічно зв'язаної води (кристалізаційної та конституційної), водню органічної речовини та інших чинників.

Нами розроблено нові підходи до інтерпретації показань нейтронних вологомірів, які зменшують похибки визначення вологості  $W_V$ , зумовлені ґрунтовими факторами, зокрема вмістом аномальних поглиначів нейтронів [4].

У даному повідомленні запропоновано новий підхід до врахування впливу щільності ґрунту на показання нейтронного вологоміра.

Діапазон зміни щільності скелета піщано-глинистих ґрунтів (в умовах їх природного залягання) здебільшого становить 1,4–1,8 г/см<sup>3</sup>. При неврахуванні цього фактора похибка визначення вологості ґрунту може досягати 10% її абсолютного значення. Наприклад, у роботі [2] стверджується, що при зміні щільності скелета ґрунту на 0,1 г/см<sup>3</sup> похибка визначення вологості ґрунту  $W_V$  становить: 1,2% (абсолютної величини  $W_V$ ) при  $W_V = 10\%$  та 3,3% при  $W_V = 40\%$ . За розрахунками [3], зміна щільності скелета ґрунту на 0,1 г/см<sup>3</sup> спричиняє похибку у визначенні  $W_V$  ґрунту 0,8% при  $W_V = 5\%$  та 1,6% при  $W_V = 35\%$ .

ГОСТ 23061–90 [5], що діє і нині, зокрема на території України, при інтерпретації показань вологомірів рекомендує побудову сім'ї емпіричних залежностей  $I$  від  $W_V$  для значень  $\rho_{ск}$ , які дорівнюють, г/см<sup>3</sup>: 0,9; 1,2; 1,5; 1,8 і 2,1. Для кожного значення щільності  $\rho_{ск}$  існує однозначна залежність між швидкістю лічби повільних нейтронів  $I_n$  і вологістю ґрунту  $W_V$ ,

$$I_n = f(W_V). \quad (1)$$

Рекомендована ГОСТом методика інтерпретації показань нейтронного вологоміра на підставі методу послідовних наближень є, на нашу думку, досить складною і недосконалою.

У статті [6] пропонується враховувати вплив щільності ґрунту  $\rho_{ск}$  на показання нейтронного вологоміра при введенні інтерпретаційного параметра  $I'_n$ , і тим самим зменшивши

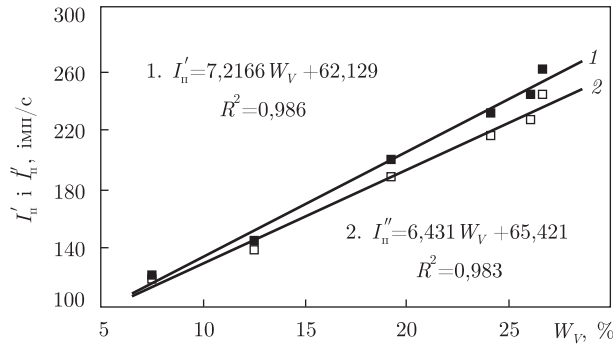


Рис. 1. Порівняння градувальних залежностей приладу ВПГР-1 з урахуванням  $\rho_{ск}$  ґрунту (1) і  $\rho$  ґрунту (2) в необсаджений свердловині діаметром 51 мм

ВПЛИВ ЗМІНИ  $\rho_{ск}$ :

$$I'_n = I_n \sqrt{\frac{\rho_{ск}^{\Gamma}}{\rho_{ск}}}, \quad (2)$$

де  $I_n$  — швидкість лічби повільних нейтронів, яка виміряна вологоміром;  $\rho_{ск}^{\Gamma}$  — щільність скелета ґрунту, використаного при градуванні нейтронного вологоміра;  $\rho_{ск}$  — щільність скелета досліджуваного ґрунту.

Однак визначення величини  $\rho_{ск}$ , що входить у вираз (2), потребує додаткових лабораторних вимірювань або використання наближених підходів.

Ми пропонуємо замість щільності скелета ґрунту  $\rho_{ск}$  використовувати безпосередньо вимірюваний параметр  $\rho$  — щільність ґрунту, що визначається гамма-щільноміром. Нами експериментально встановлено, що поправкою за щільність ґрунту до показань нейтронного вологоміра  $I_n$  також може бути величина  $\sqrt{\rho_{в}/\rho}$  — квадратний корінь відношення щільностей прісної води і ґрунту на горизонті дослідження його вологості. Інтерпретаційний параметр у цьому випадку буде таким:

$$I''_n = I_n \sqrt{\frac{\rho_{в}}{\rho}}. \quad (3)$$

На рис. 1 представлені градувальні залежності інтерпретаційних параметрів  $I'_n$  (2) і  $I''_n$  (3) від вологості ґрунту. Видно, що чутливості та коефіцієнти кореляції для обох способів обчислення цих параметрів виявилися практично однаковими. Істотною перевагою використання виразу (3) є значне спрощення, здешевлення і зменшення витрат часу при визначенні вологості. Для його реалізації достатньо виміряти у тій самій свердловині за допомогою радіоізотопного щільноміра реальне значення  $\rho$  досліджуваного ґрунту.

На рис. 2 наведено отримані нами градувальні залежності від вологості для приладу ВПГР-1, побудовані за вимірюваннями у піщано-глинистих ґрунтах (моренний суглинок та лесовий супісок), прорізаних свердловинами діаметром 51 та 76 мм. Свердловина діаметром 51 мм може бути обсаджена сталевими трубами завтовшки стінки 5,5 мм, свердловина діаметром 76 мм — сталевими трубами діаметром 76 мм і завтовшки стінки 4,0 мм.

У табл. 1 наведено метрологічні характеристики приладу за результатами аналізу градувальних залежностей для визначення вологості за  $I''_n$  (див. рис. 2). Дані отримано для середніх значень вологості ґрунту (а саме,  $W_v = 19\%$ ) і вимірювань  $I_n$  з експозицією  $t = 100$  с та довірчої імовірності  $\alpha = 0,95$ .

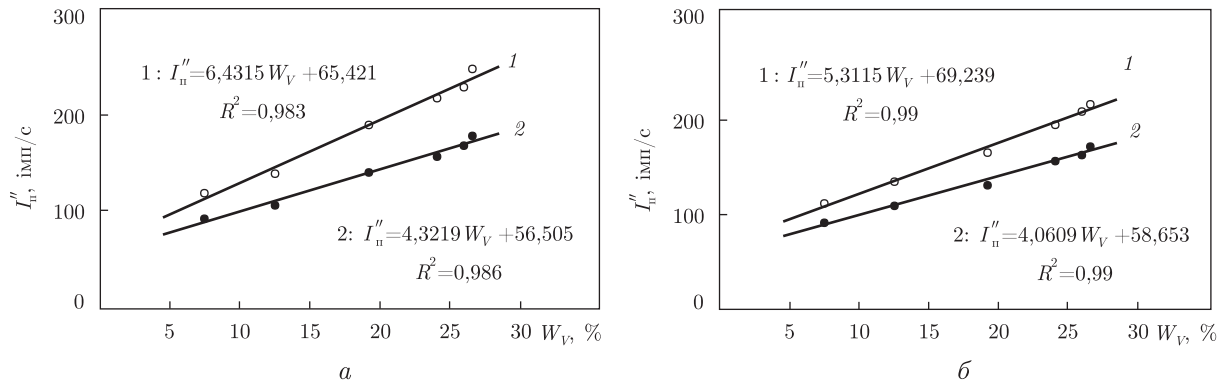


Рис. 2. Градувальні залежності приладу ВПГР-1 з урахуванням фактора щільності ґрунту. Свердловина діаметром 51 мм (а) і 76 мм (б). Шифр кривих: 1 — свердловина необсаджена; 2 — свердловина обсаджена

Таблиця 1. Метрологічні характеристики нейтронного вологоміра

Конструкція свердловини		$N_n$ , імп. за 100 с	$\varepsilon(I''_n)$ , ч. о.	$S_a$ , 1/(с · %)	$S_b$ , 1/%	$\Delta W_V$ , %
$d_{св} = 51$ мм	Необсаджена	24800	0,0191	7,22	0,034	0,53
	Обсаджена	18340	0,0265	4,88	0,032	0,79
$d_{св} = 76$ мм	Необсаджена	21690	0,0191	6,00	0,032	0,58
	Обсаджена	17240	0,0221	4,50	0,031	0,71

У таблиці наведено такі позначення:  $N_n$  — загальне число імпульсів  $N_n = I_n \cdot t$ ;  $\varepsilon(I''_n)$  — відносна статистична похибка інтерпретаційного параметра  $I''_n$ , яка обчислюється за формулою  $\varepsilon(I''_n) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i)^2}$ , частка одиниці (ч. о.); ( $n$  — число виміряних величин, що визначають інтерпретаційний параметр;  $\varepsilon_i$  — відносні статистичні похибки виміряних складових  $I''_n$ );  $S_a$  — абсолютна чутливість приладу до  $W_V$ , яка визначається як  $S_a = dI''_n/dW_V$ , 1/(с · %);  $S_b$  — відносна чутливість вологоміра до  $W_V$ :  $S_b = dI''_n/(I''_n dW_V)$ , 1/%;  $\Delta W_V$  — статистична складова похибки обчислення  $W_V$ , %:  $\Delta W_V = \varepsilon(I''_n) \cdot I''_n/S_a$ .

Таким чином, запропонований підхід до побудови інтерпретаційних залежностей для нейтронних вологомірів має такі переваги: враховується зміна щільності ґрунту при визначенні його вологості в зоні аерації, що зменшує похибки в  $W_V$ ; відпадає потреба у виконанні лабораторних досліджень ядерного матеріалу ґрунту, тим самим підвищується оперативність і зменшується вартість визначень вологості  $W_V$ ; параметри об'ємної вологості  $W_V$  (визначаються нейтронним вологоміром) і об'ємної маси (щільність) ґрунту  $\rho$  (гамма-щільноміром) використовуються при розв'язанні задач інженерної геології, а також у ході агро-меліоративних та екологічних досліджень.

1. Ферронский В. И., Данилин А. Н., Дубинчук В. Т., Гончаров В. С., Селецкий Ю. Б. Радиоизотопные методы исследования в инженерной геологии и гидрогеологии. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Атомиздат, 1977. — 304 с.
2. Арцыбашев В. А. Ядерно-геофизическая разведка. — 2-е изд. — Москва: Атомиздат, 1980. — 224 с.
3. Olgaard P. L. On the theory of the neutronic method for measuring the water content in soil. — Riso Report, No 97. — Copenhagen, 1965. — 44 p.
4. Кетов А. Ю., Звольський С. Т. Сукупне визначення вологості та засоленості ґрунтів зрошувального землеробства за допомогою нейтронних методів // Доп. НАН України. — 2008. — № 10. — С. 122–126.

5. ГОСТ 23061–90. Грунты. Методы радиоизотопных измерений плотности и влажности. Приложение 8. Градуировочная зависимость нейтронного влагомера.
6. Greacen E. L., Schrale G. The effect of bulk density on neutron meter calibration // Australian J. Soil Res. – 1976. – No 14. – P. 159–169.

*Институт геофізики ім. С. І. Субботіна  
НАН України, Київ*

*Надійшло до редакції 23.06.2009*

**A. Yu. Ketov, S. T. Zvol's'kyi, M. S. Bondarenko, O. V. Ivanenko**

**Interpretative relationships for neutron moisture gauges with regard for the soil density**

*A new approach considering the effect of the soil bulk density on the readings of neutron moisture gauges at the determination of the soil water content is proposed.*