



УДК 550.835

С. Т. Звольський

Визначення вологості ґрунтів різної щільності радіоізотопними методами

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

Розрахунками та експериментом ідентифіковано адитивну складову швидкості лічби нейтронним вологоміром, зумовлену щільністю скелета ґрунту. З урахуванням її та за даними лабораторних визначень об'ємної вологості та щільності скелета ґрунту проілюстровано побудову єдиної — для всього інтервалу можливих змін щільності скелета ґрунту — градуовальної залежності нейтронного вологоміра. Для інтерпретації свердловинних вимірювань у цій залежності замінено щільність скелета ґрунту на щільність ґрунту природної вологості, яку визначають радіоізотопним щільноміром безпосередньо в досліджуваній свердловині.

Визначення показників фізичного стану ґрунтів все частіше відбувається за допомогою радіоізотопних методів. Зокрема, вологість ґрунту визначають нейтрон-нейтронним методом за повільними нейтронами (ННМ-п).

У доінверсійній області довжин зонда (відстані від джерела до середини довжини лічильника нейтронів) графічно градуовальні залежності нейтронних вологомірів наближаються до прямої лінії зі зменшенням довжини зонда до нульового значення. Для таких вологомірів (при сталій щільності сухого ґрунту (далі його скелета ρ_d), при відсутності хімічно зв'язаного ґрунтом водню (глинистих мінералів і органічної речовини) та при відсутності в ньому аномальних поглиначів теплових нейтронів) існує однозначна залежність між I_0 і W_V ґрунту:

$$I_0 = f(W_V), \quad (1)$$

де I_0 — швидкість лічби повільних нейтронів, імп/с; W_V — об'ємна вологість ґрунту, %.

Однак щільність ґрунту не є сталою в його геологічному розрізі. Тут ґрунт однієї й тієї самої вологості може характеризуватися різною щільністю, що приводить до похибок у визначенні його вологості. За даними Р. Olgaard [1], зміна ρ_d ґрунту на $0,1 \text{ г/см}^3$ приводить до зміни I_0 на величину, що відповідає зміні вологості (похибки її визначення за повільними нейтронами), яка дорівнює $0,8\%$ для $W_V = 5\%$ й $1,6\%$ для $W_V = 35\%$. У діапазоні зміни ρ_d піщано-глинистих ґрунтів, який частіше становить $1,3\text{--}1,8 \text{ г/см}^3$, абсолютна похибка визначення W_V ґрунту, що зумовлена зміною його щільності, може дорівнювати 8% і більше.

Для зменшення похибки визначення вологості ґрунту, зумовленої його щільністю, ДСТУ Б В. 2.1–26 : 2009 [2] рекомендує інтерпретацію показань нейтронного вологоміра виконувати за сімейством градууювальних залежностей I_0 від W_V для значень ρ_d , що дорівнюють, г/см³: 0,9, 1,2, 1,5, 1,8, 2,1. Для кожного значення ρ_d справджується однозначна залежність (1), яка побудована для щільності максимально наближеної до щільності ґрунту на горизонті визначення його вологості W_V . Відшукування такої залежності в сімействі градууювальних графіків є складним і трудомістким процесом.

Є інші наближені способи врахування поправки на щільність ґрунту при визначенні його вологості за показаннями нейтронного вологоміра. Наприклад, у роботі [3] запропоновано такий поправковий коефіцієнт на ρ_d ґрунту до показань нейтронного вологоміра:

$$k = \sqrt{\frac{\bar{\rho}_d}{\rho_d^i}}, \quad (2)$$

де $\bar{\rho}_d$ — середнє значення ρ_d ґрунту у вертикальному геологічному розрізі досліджуваної ділянки; ρ_d^i — щільність сухого ґрунту i -го шару цієї ділянки.

Суть цього способу полягає в урахуванні відхилення ρ_d i -го шару від $\bar{\rho}_d$ у досліджуваному геологічному розрізі, для якої будувалась градууювальна залежність вологоміра (компенсація відхилення).

Відкоригований інтерпретаційний параметр градууювальної залежності $I(W_V)$ у цьому випадку має вигляд

$$I = I_0 \sqrt{\frac{\bar{\rho}_d}{\rho_d^i}} \quad (3)$$

(тут I_0 — швидкість лічби нейтронів, яку вимірювали вологоміром (показання вологоміра)). Недоліком такого способу [3] є те, що визначення ρ_d , яке входить до виразу (3), потребує відбирання проб ґрунту із шурфів та лабораторних вимірювань їх щільності. Більш вагомим його недоліком є неоднозначність коефіцієнта k , визначеного для певного горизонту ґрунту, при різних потужностях досліджуваного шару цього ґрунту і різній його літології.

В роботі [4] удосконалено і розширено застосування способу шляхом заміни в ньому середнього значення ρ_d для досліджуваної товщі ґрунтів на $\rho_d = 1$ г/см³ і заміни при інтерпретації свердловинних вимірювань ρ_d на природну щільність ґрунту ρ .

При вимірюваннях вологості ґрунту нейтронним вологоміром на вході вимірювальної системи є ґрунт різної вологості та швидкі нейтрони джерела. Кінцевим результатом складної взаємодії нейтронів джерела з ґрунтом, тобто на виході вимірювальної системи, є швидкість лічби вологоміром повільних нейтронів.

В існуючих розрахункових даних і в наближених способах врахування поправки на щільність ґрунту (при визначенні його вологості нейтронним вологоміром) чітко прослідковується залежність швидкості лічби повільних нейтронів і від вологості ґрунту, і від його щільності [1–4]. Це підтверджують і наші розрахунки швидкості лічби повільних нейтронів I_0 (іпм/с) для приладу вологомір поверхнево-глибинний радіоізотопний (ВППР-1 [5]) (за програмою CORA, автори В. В. Кулик, Ю. В. Яковлев, Т. М. Гусак, Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України) для піщаного середовища при заданих значеннях його вологості і змінних значеннях щільності (рис. 1).

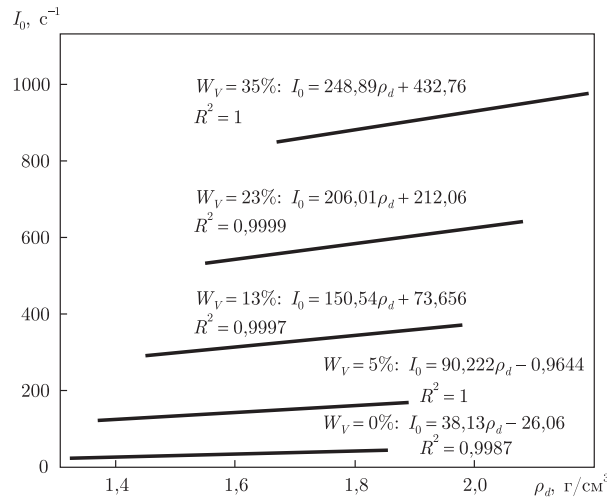


Рис. 1. Залежність приросту швидкості лічби повільних нейтронів, зумовленого щільністю скелета ґрунту при заданій вологості

Швидкість лічби повільних нейтронів у вологому ґрунті, в якому відсутні аномальні поглиначі теплових нейтронів і зв'язаний його мінеральною частиною водень (відсутні глинисті мінерали й органічна речовина), можна навести таким співвідношенням:

$$I_0(W_V, \rho_d) = I(W_V) + I(\rho_d), \quad (4)$$

де $I(W_V)$ — компонент швидкості лічби, зумовлений вологістю ґрунту W_V ; $I(\rho_d)$ — компонент швидкості лічби вологоміра, зумовлений щільністю сухого ґрунту ρ_d (усереднений ефект збільшення швидкості лічби повільних нейтронів, зумовлений скелетом ґрунту).

Ідентифікація тієї частини швидкості лічби повільних нейтронів, яка спричинена скелетом ґрунту, лягла в основу пропонованого нами врахування адитивної поправки на щільність ґрунту при визначенні його вологості нейтронним вологоміром.

За даними [1] і нашими розрахунками (див. рис. 1) видно, що швидкість лічби вологоміра $I(\rho_d)$ зумовлена ρ_d ґрунту при $W_V = 0\%$ (позначимо її $I_1(\rho_d)$) і складовою $I_2(\rho_d, W_V)$, спричиненою посиленням взаємодії нейтронів з мінеральною частиною вологого ґрунту.

Складову швидкості лічби вологоміра, зумовлену ρ_d ґрунту, можна записати як

$$I(\rho_d) = I_1(\rho_d) + I_2(\rho_d, W_V). \quad (5)$$

Формула (4) набуває такого вигляду:

$$I_0(W_V, \rho_d) = I(W_V) + I_1(\rho_d) + I_2(\rho_d, W_V). \quad (6)$$

Для вологоміра ВПГР-1 [5] (потужність джерела нейтронів $Q = 4,2 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$, детектор нейтронів типу СНМ-17) розрахункову залежність $I_1(\rho_d)$ від щільності сухого ($W_V = 0\%$) піщаного ґрунту ρ_d запишемо таким чином:

$$I_1(\rho_d) = 38,13\rho_d - 26,06. \quad (7)$$

Складова $I_2(\rho_d, W_V)$ залежить і від ρ_d , і від W_V ґрунту. Для неї ми встановили, що

$$I_2(\rho_d, W_V) = I_1(\rho_d)B \ln W_V, \quad (8)$$

де B — стала величина; $\ln W_V$ — логарифм значення об'ємної вологості.

Із залежностей (4)–(8) для інтерпретаційного параметра маємо:

$$I(W_V) = I_0(W_V, \rho_d) - [I_1(\rho_d) + I_1(\rho_d)B \ln W_V]. \quad (9)$$

Складову у формулі (9) виділено квадратними дужками, вона трансформується в похибку визначення вологості ґрунту нейтронним вологоміром, спричинену щільністю його скелета. Величину множника B встановлено нами за даними Р. Olgaard [1], а саме: при W_V ґрунту, що дорівнює 35%, похибка визначення його вологості (що зумовлена ρ_d) збільшується у 2 рази в порівнянні з такою при вологості цього ґрунту, яка дорівнює 5%.

Виходячи з цих даних [1] і враховуючи формули (5) й (8), можна записати:

$$\frac{2(I_1 + I_1 B \ln 5)}{S_a} = \frac{I_1 + I_1 B \ln 35}{S_a}, \quad (10)$$

де S_a — абсолютна чутливість вологоміра до вологості ґрунту, імп/(с · %).

Після спрощень рівняння (10) набуває вигляду

$$B = \frac{1}{\ln 35 - 2 \ln 5}. \quad (11)$$

Множник (коефіцієнт) B виявився дорівнюючим 0,3.

Оскільки потужність джерела нейтронів, що використовується у конкретному вологомірі, дають з деякою похибкою, потрібно зробити прив'язку (погодження) експериментальної градууювальної залежності вологоміра до розрахункової, виконаної за паспортним значенням потужності джерела.

Прив'язку роблять за складовою $I_1(\rho_d)$, яка виміряна в моделі “сухий кварцовий пісок” ($W_V = 0\%$; $I(W_V) = 0$ імп/с; $I_2(\rho_d, W_V) = 0$ імп/с; $I_1(\rho_d) = I_0(\rho_d)$). Габарити моделі мають задовольняти умовам глибинності досліджень ґрунту ННМ-п, а діаметр тонкостінної алюмінієвої обсадної труби, що імітує необсажену свердловину, — діаметру цієї свердловини.

Так, для використаного нами вологоміра швидкість лічби в моделі “сухий кварцовий пісок” ($\rho_d = 1,57$ г/см³; $W_V = 0,15\%$) виявилась дорівнюючою 39 імп/с, з них $8,2 \cdot 0,15 = 1,23$ імп/с зумовлені вологістю піску (8,2 — абсолютна чутливість використаного вологоміра до вологості ґрунту, імп/(с · %)). Сухим піском створюється швидкість лічби $39 - 1,23 = 37,8$ імп/с.

Розрахункова швидкість лічби вологоміра (паспортне значення $Q = 4,2 \cdot 10^4$ с⁻¹) у сухому піску $I_1(\rho_d) = I_0(\rho_d) = 33,8$ імп/с (див. рис. 1). Отже, коефіцієнт погодженості експериментальної градууювальної залежності з розрахунковою $K_{\Pi} = 37,8 : 33,8 = 1,1175$.

З урахуванням коефіцієнта погодженості вираз (9) для вологоміра буде таким:

$$I(W_V) = I_0(W_V, \rho_d) - [(42,6\rho_d - 29,1) + (42,6\rho_d - 29,1)B \ln W_V]. \quad (12)$$

Його використовують для побудови єдиної для всього інтервалу можливих змін ρ_d градууювальної залежності нейтронного вологоміра (рис. 2).

Параметри W_V й ρ_d визначають лабораторно. Показання приладу $I_0(W_V, \rho_d)$ для шару ґрунту із заданими значеннями параметрів W_V й ρ_d отримують, використавши свердловинні вимірювання.

Внесення поправки на щільність ґрунту при свердловинних визначеннях його вологості нейтронним вологоміром на основі формули (12), а, по суті, на основі лабораторного визначення W_V й ρ_d , трудно здійснене.

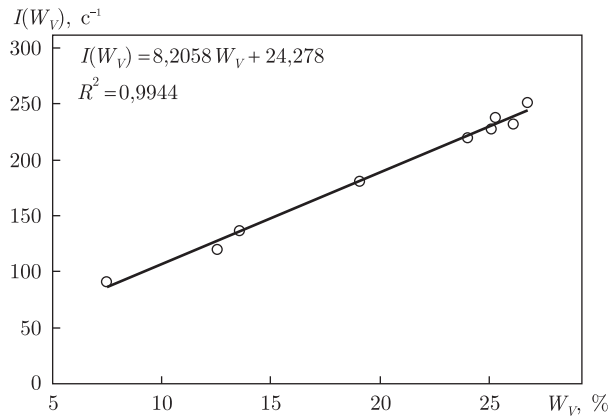


Рис. 2. Градувальна залежність нейтронного вологоміра, що побудована за співвідношенням (12)

Нами трансформовано рівняння (12) до вигляду:

$$I(W_V) = I_0(W_V, \rho_d) - [42,6(\rho - 0,01 \cdot W_V^H \rho_B) - 29,1]K_1 - [42,6(\rho - 0,01 \cdot W_V^H \rho_B) - 29,1]BK_2 \ln W_V^H, \quad (13)$$

де ρ , $г/см^3$ — щільність природного ґрунту, що визначена за допомогою гамма-щільноміра; ρ_B , $г/см^3$ — щільність прісної води; W_V^H , % — позірна вологість ґрунту, що визначена за допомогою нейтронного вологоміра за градувальною залежністю $I(W_V) = f(W_V)$ (12) та його показаннями $I_0(W_V, \rho_d)$; K_1 й K_2 — трансформаційні коефіцієнти.

Оскільки $W_V^H > W_V$, множник $(\rho - 0,01 W_V^H \rho_B)$ у виразі (13) менший за ρ_d ($\rho_d = \rho - 0,01 W_V \rho_B$), це веде до деякого зменшення швидкості лічби $I_0(W_V, \rho_d)$, що практично повністю компенсується множником K_1 , який визначають із виразу:

$$(42,6\rho_d - 29,1) = [42,6(\rho - 0,01 \cdot W_V^H \rho_B) - 29,1]K_1. \quad (14)$$

З цієї ж причини ($W_V^H > W_V$) множник $\ln W_V^H > \ln W_V$, що веде до певного зростання швидкості лічби $I_0(W_V, \rho_d)$ при одночасному зменшенні її за рахунок множника $(\rho - 0,01 W_V^H \rho_B)$. Ці зміни I_2 компенсують введенням коефіцієнта K_2 , величину якого визначають із виразу:

$$[42,6(\rho - 0,01 \cdot W_V^H \rho_B) - 29,1]BK_2 \ln W_V^H = (42,6\rho_d - 29,1)B \ln W_V. \quad (15)$$

Нами розраховано коефіцієнти K_1 й K_2 для ρ_d , що дорівнюють 1,2, 1,4, 1,6 $г/см^3$, та W_V ґрунту — 5, 10, 20, 30, 35%.

Встановлено, що коефіцієнти K_1 й K_2 певною мірою залежать від вологості W_V , а коефіцієнт K_2 — від щільності ґрунту ρ_d . У формулі (13) використовують їх середні значення, визначене для діапазону вологості від 10 до 30% і щільності скелета (сухої частини) ґрунту від 1,2 до 1,6 $г/см^3$. У наведеному діапазоні значень W_V й ρ_d середня величина коефіцієнта $K_1^c = 1,108$, а $K_2^c = 0,988$.

Було досліджено зміни складових $I_1(\rho_d)$ і $I_2(\rho_d, W_V)$ при використанні в залежності (13) замість справжніх значень коефіцієнтів K_1 й K_2 їх середні значення K_1^c й K_2^c , а також трансформації цих змін швидкостей лічби в похибки визначення вологості за формулою (12). Похибка $\Delta W_V(K_1, K_2)$, що зумовлена заміною в залежності (13) дійсних значень коефіцієнтів K_1 й K_2 на їх середні значення, становила 0,25%.

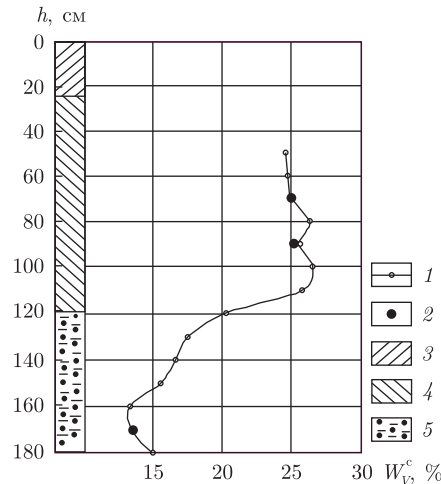


Рис. 3. Розподіл сумарної вологості ґрунту в геологічному розрізі свердловини: 1 — об'ємна вологість ґрунту, що визначена за (13); 2 — вологість ґрунту, що визначена за термоваговим способом; 3 — насипний ґрунт; 4 — важкий супісок; 5 — глинистий пісок

У цілому, похибка визначення вологості ґрунту за інтерпретаційною залежністю (13), замість інтерпретаційної залежності (12), виявилась малою при порівнянні її з припустимою похибкою визначення об'ємної вологості ґрунту радіоізотопними методами ($\Delta W_V = \pm 2\%$). Побудовані за ними градувальні залежності практично збігаються між собою. Це дозволяє побудувати градувальну залежність нейтронного вологоміра за формулою (12), тобто на основі класичних термовагових визначень щільності скелета ґрунту ρ_d і його вологості W_V , а інтерпретаційний параметр свердловинних вимірювань $I(W_V)$ знаходити за співвідношенням (13). Параметр ρ для досліджуваних шарів ґрунту визначають за допомогою радіоізотопного гамма-гамма-щільноміра (наприклад, типу ППГР-1). Параметр W_V^H визначають за показаннями нейтронного вологоміра — $I_0(W_V, \rho_d)$, скориставшись графіком рис. 2. Розрахований, згідно з залежністю (13), параметр $I(W_V)$ інтерпретують за вказаним графіком.

Вимірювання вологості ґрунтів різної щільності радіоізотопними методами випробувано на дослідному майданчику Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України. У приповерхневому шарі ґрунти тут складені важким супіском, який з глибини 110 см переходить у пісок. Випробування виконано за допомогою нейтронного вологоміра типу ВПГР-1 у необсаджений свердловині діаметром 50 мм.

Інтерпретацію свердловинних вимірювань вологоміром виконано, згідно з (13). За цим співвідношенням визначали сумарний інтерпретаційний параметр $[I(W_V^c) = I(W_V) + I(W_V^{x.3})]$, де $I(W_V^{x.3})$ — еквівалент хімічно зв'язаної води глинистих мінералів]. Параметр $W_V^{x.3}$ знаходять за гамма-каротажем (ГК) вимірюванням коефіцієнта глинистості ґрунту та НК вимірюванням його сумарної вологості [6]. При градуванні вологоміра та контрольних вимірюваннях у свердловині $W_V^{x.3}$ визначають лабораторно (термоваговим способом з дотриманням рекомендацій [2]). Визначені нами лабораторно величини $W_V^{x.3}$ для важкого супіску дослідного майданчика виявилися дорівнюючими 0,7% об'ємної вологості в інтервалі глибин 50–70 см та 1,5% — в інтервалі глибин 80–100 см. Результати інтерпретації вимірювань на дослідному майданчику демонструє рис. 3, з якого видно, що встановлена нейтронним вологоміром вологість ґрунту збігається з її контрольними вимірюваннями термоваговим способом (за хімічно зв'язаної води глинистих мінералів). Розходження ви-

значень вологості ґрунту нейтронним вологоміром і класичним термоваговим способом не перевищують 1%.

Таким чином, визначення адитивної поправки на щільність ґрунту та заміна ρ_d на ρ істотно спрощує інтерпретацію свердловинних радіоізотопних вимірювань вологості, підвищує їх точність та оперативність.

1. *Olgaard P. L.* On the theory of the neutronic method for measuring the water content in soil: Risö Report 97. – Copenhagen, 1965. – 44 p.
2. ДСТУ Б В. 2.1–26:2009. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи радіоізотопного вимірювання щільності і вологості. – Введ. 01.10.2010.
3. *Greacen E. L., Schrale G.* The effect of bulk density on neutron meter calibration // Austral. J. Soil Res. – 1976. – No 14. – P. 159–169.
4. *Кетов А. Ю., Іващенко С. О., Звольський С. Т.* Поправка на щільність ґрунту при визначенні його вологості нейтронними вологомірами // Доп. НАН України. – 2012. – № 3. – С. 118–122.
5. *Техническое описание и инструкция по эксплуатации.* Влагомер поверхностно-глубинный радиоизотопный ВПГР-1. – Полтава: Изд-во Полтава, 1982. – 43 с.
6. *Кулик В., Бондаренко М., Кашуба Г., Стасів О.* Адитивний і мультиплікативний способи врахування глинистості порід при визначенні їх пористості за допомогою нейтронного і акустичного каротажу // Вісн. КНУ ім. Т. Г. Шевченка. Сер. Геологія. – 2008. – Вип. 45. – С. 34–38.

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна
НАН України, Київ

Надійшло до редакції 23.12.2013

С. Т. Звольський

Определение влажности ґрунтов разной плотности радиоизотопными методами

Расчетами и экспериментом идентифицирована аддитивная составляющая скорости счета нейтронным влагомером, вызванная плотностью скелета ґрунта. С учетом ее и по данным лабораторных определений объемной влажности и плотности скелета ґрунта проиллюстрировано построение единой — для всего интервала возможных изменений плотности скелета ґрунта — градуировочной зависимости нейтронного влагомера. Для интерпретации скважинных измерений в этой зависимости заменена плотность скелета ґрунта на плотность ґрунта естественной влажности, которую определяют радиоизотопным плотномером непосредственно в исследуемой скважине.

S. T. Zvoltsky

Determination of the moisture content of soils with different densities by radioisotope methods

By calculations and experimentally, the additive component of the count rate of a neutron moisture meter, which is caused by the soil framework density, is identified. These data and the laboratory data on the bulk moisture and the soil framework density allow the construction of a single calibration curve for a neutron moisture meter in the entire interval of possible variations in the soil framework density. To interpret the results of borehole measurements with this curve, the soil framework density is replaced by the density of soil with a natural moisture, which was determined with a radioisotope density gage directly in a borehole under study.