

А. Ю. Кетов, С. О. Іващенко, С. Т. Звольський

Поправка на щільність ґрунту при визначенні його вологості нейтронними вологомірами

(Представлено академіком НАН України В. І. Ляльком)

Експериментально підтверджена запропонована авторами поправка на щільність ґрунту при визначенні його вологості нейтронними вологомірами. Поправка уможливорює побудову єдиної градуовальної залежності для усього діапазону можливих змін щільності ґрунту. Використання поправки на щільність ґрунту спрощує інтерпретацію показань нейтронного вологоміра.

Визначення вологості ґрунту в умовах *in situ* ефективно й оперативно виконано за допомогою нейтрон-нейтронного методу за повільними нейтронами (ННМ-п), який реалізується у вигляді нейтронного каротажу вологості (НК-п).

Суть ННМ-п полягає в опроміненні досліджуваного ґрунту швидкими нейтронами стаціонарного джерела, реєстрації детектором повільних нейтронів на певній відстані від джерела по стовбуру свердловини. Повільні нейтрони утворюються внаслідок взаємодії швидких нейтронів джерела з ядрами атомів, які складають ґрунт насамперед з ядрами атомів водню. Показання детектора (вологоміра) знімались у вигляді швидкості лічби повільних нейтронів, частіше у дискретній формі (поточкові вимірювання).

Свердловинні нейтронні вологоміри в цих дослідженнях працюють у доінверсійній зоні довжин зонда (відстані від джерела до середини довжини лічильника нейтронів). У цій зоні збільшення об'ємної вологості ґрунту W_V (%) приводить до зростання показань вологоміра I_0 (імп/с). Графічно градуовальні залежності таких вологомірів наближаються до прямої лінії зі зменшенням довжини зонда L до нульового значення. Для таких вологомірів (при сталій щільності сухого незасоленого ґрунту і при відсутності зв'язаної води глинистих мінералів ($W_V^3 = 0$)) існує однозначна залежність між I_0 та W_V цього ґрунту:

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

Однак щільність ґрунту істотно змінюється в геологічному розрізі, що призводить до похибок у визначенні його вологості. Так, за даними Olgaard [1], зміна щільності сухого ґрунту ρ_d (г/см³) непорушеної структури на 0,1 г/см³ призводить до абсолютної похибки визначення його вологості за повільними нейтронами, яка дорівнює 0,8% для $W_V = 5\%$ і $W_V = 1,6\%$ для $W_V = 35\%$. У діапазоні зміни ρ_d піщано-глинистих ґрунтів, який частіше становить 1,3–1,8 г/см³, абсолютна похибка визначення W_V ґрунту, що зумовлена його щільністю, може дорівнювати 8% і більше.

Для того щоб зменшити такі похибки, ДСТУ Б В.2.1–26:2009 [2] рекомендує при інтерпретації показань нейтронного вологоміра будувати сімейство емпіричних градуовальних 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). Користуватися сімейством емпіричних залежностей ДСТУ рекомендує таким чином.

За орієнтовно вибраним графіком із сімейства градувальних залежностей вологоміра знаходять перше наближення W_V . За подальшими графіками, для яких ρ_d , більше на $0,3 \text{ г/см}^3$ або менше на $0,3 \text{ г/см}^3$, знаходять друге наближення W_V . Якщо друге наближення відрізняється від першого на величину $\Delta W_V \leq 1\%$ абсолютного значення W_V , то його (перше наближення) приймають за реальне значення вологості ґрунту W_V . В іншому випадку знаходять третє наближення W_V за другим і третім вибраними графіками. Порівнюють друге й третє наближення W_V . Таким чином продовжують випробовувати графіки залежностей I_0 від W_V , поки чергове наближення W_V буде відрізнятися від попереднього на величину $\Delta W_V \leq 1\%$. Це трудомісткий процес, якщо врахувати те, що щільність сухого ґрунту в його геологічному розрізі здебільшого значно змінюється. Визначення вологості ґрунту цим способом потребує багато часу на його виконання.

Greacen E. L. і Sharle G. [3] встановили, що поправковим коефіцієнтом на щільність сухого ґрунту ρ_d до показань нейтронного вологоміра може бути величина

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

де $\bar{\rho}_d$ — середнє значення щільності сухого ґрунту у вертикальному геологічному розрізі досліджуваної ділянки (наприклад, при агрофізичних дослідженнях зони активного водообміну (2,0–2,5 м)); ρ_d^i — щільність сухого ґрунту i -го шару досліджуваної ділянки; $\bar{\rho}_d$ й ρ_d^i вимірюють за пробами ґрунту, відібраними у шурфах, які розташовані по краях досліджуваної ділянки [4]. Геологічні розрізи шурфів репрезентують геологічний розріз ділянки, що вивчається.

Відкоригований інтерпретаційний параметр I 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)). За цим інтерпретаційним параметром будують градувальну залежність вологоміра [3]. Недоліком такого способу [3] є те, що визначення ρ_d , яке входить до виразу (2), потребує відбирання проб ґрунту із шурфів та лабораторних вимірювань щільності. Це призводить до збільшення вартості робіт, обмежує глибини, на яких доцільне використання вказаного способу.

Більш вагомим його недоліком є неоднозначність коефіцієнта k , визначеного для певного горизонту ґрунту, при різних потужностях досліджуваного шару цього ґрунту і різній літології.

Нами запропоновано поправковий коефіцієнт до показань нейтронного вологоміра I_0 визначати на щільність ґрунту природної вологості (ρ , г/см^3). Тому ми виходили з того, що максимальне показання короткозондового вологоміра, наприклад типу ВПГР-1 (вологомір поверхнево-глибинний радіоізотопний), отримується у фізичній моделі “прісна вода” ($W_V = 100\%$; ($\rho = 1,00 \text{ г/см}^3$) — 89% його зумовлена киснем і лише 11% — воднем). Додавання в цю модель сухого піщаного ґрунту спричинить зменшення швидкості лічби вологоміра, що зумовлено воднем, і деяке збільшення її за рахунок зростання щільності середовища фізичної моделі.

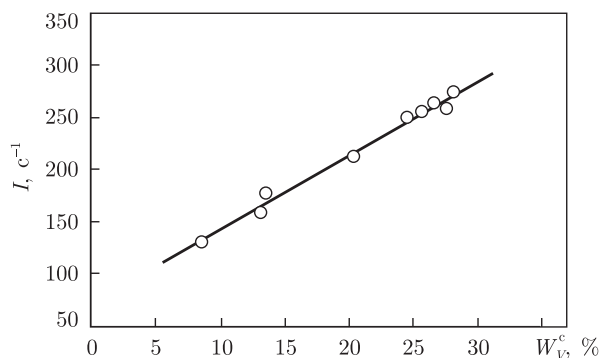


Рис. 1. Експериментальна залежність інтерпретаційного параметра I для приладу ВПГР-1 від сумарної вологості піщано-глинистого ґрунту.

$$I = 6,1323W_V^c + 62,738, r^2 = 0,992$$

Отже, було встановлено, що виділити швидкість лічби вологоміра, зумовлену щільністю ґрунту, та ідентифікувати швидкість лічби, що відповідає вологості цього ґрунту, можна при введенні в показання вологоміра такий поправковий коефіцієнт:

$$k = \sqrt{\frac{\rho_B}{\rho}}, \quad (4)$$

де ρ_B — щільність прісної води.

Інтерпретаційний параметр для вказаного способу визначення вологості ґрунту, що враховує лише швидкість лічби нейтронів, зумовлену вологістю (воднем) ґрунту W_V та зв'язаною водою глинистих мінералів W_V^3 , є таким:

$$I = f(W_V, W_V^3) = I_0 \sqrt{\frac{\rho_B}{\rho}}. \quad (5)$$

Зв'язану воду глинистих мінералів W_V^3 , як і гравітаційну, визначають лабораторним шляхом [2]. $k \leq 1$ для $\rho \geq \rho_B$ та $k \geq 1$ для $\rho \leq \rho_B$ (наприклад, для алювіальних глинистих ґрунтів).

Поправковий коефіцієнт на щільність ґрунту вводять безпосередньо у градувальну залежність вологоміра при її побудові для довільних літологічних прошарків піщано-глинистих ґрунтів (будують залежність I від W_V^c (сумарна вологість $W_V^c = W_V + W_V^3$)), а їх природну щільність визначають за допомогою гамма-гамма щільноміра безпосередньо у досліджуваній свердловині. Це значно спрощує, здешевлює та зменшує витрати часу при визначенні вологості ґрунту за ННМ-п.

Експериментальну градувальну залежність нейтронного вологоміра типу ВПГР-1 [5] для умов вимірювання у необсаджений свердловині діаметром 51 мм, побудовану за інтерпретаційним параметром I , що враховує поправковий коефіцієнт на щільність ґрунту природної вологості (формула (5)) та вміст зв'язаної води глинистих мінералів, демонструє рис. 1. Інтерпретацію свердловинних вимірювань за цим графіком починають з внесення поправкового коефіцієнта на щільність ґрунту до показань вологоміра I_0 , тобто з знаходження інтерпретаційного параметра I . Зв'язану воду глинистих мінералів віднімають від сумарної (W_V^c), визначеної за графіком рис. 1.

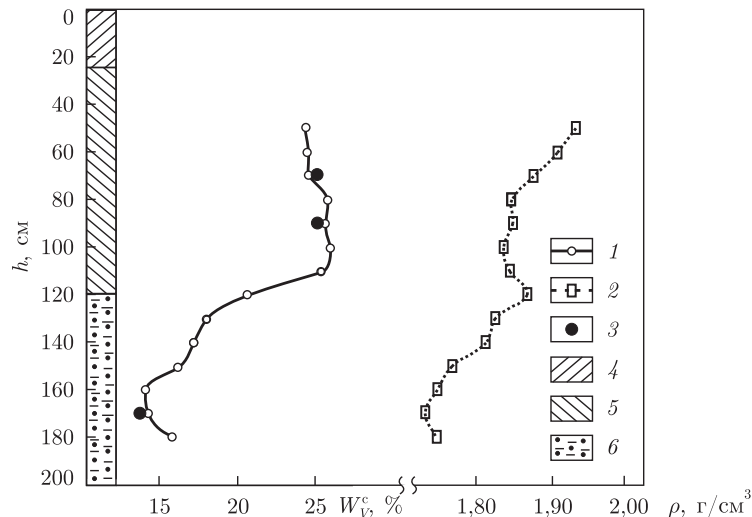


Рис. 2. Розподіл сумарної вологості ґрунту в свердловині дослідного майданчика: 1 — вологість ґрунту W_V^c , що визначена за I ; 2 — природна щільність ґрунту ρ ; 3 — вологість ґрунту W_V , що визначена термоваговим способом; 4 — насипний ґрунт; 5 — важкий супісок; 6 — глинистий пісок

Коректність використання поправки на щільність ґрунту за формулам (4) й (5) підтверджено експериментальними вимірюваннями у свердловині на дослідному майданчику Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України.

Розподіл об'ємної вологості ґрунту $W_V^c = W_V + W_V^3$ за глибиною його залягання в геологічному розрізі майданчика ілюструє рис. 2. Графік 1 інтерпретаційного параметра побудовано за градуальною залежністю рис. 1. Паралельно наведено графік 2 розподілу природної щільності ґрунту за глибиною його залягання.

Вологість ґрунту, яку визначено за I (рис. 2), добре узгоджується з її контрольними вимірюваннями термоваговим способом. Зауважимо, що вміст води у глинистих мінералах (W_V^3), який встановлювали, згідно з рекомендаціями [2], дорівнював на глибинах 50...70 см $W_V^3 = 0,7\%$, а на глибинах 80...100 см $W_V^3 = 1,5\%$. Абсолютна статистична (апаратна) похибка вимірювання вологості ΔW_V^{ct} становила $< 1\%$ (при експозиції вимірювання $t = 100$ с ($N_0 = I_0 \cdot t$; $N_{\gamma\gamma} = I_{\gamma\gamma} \cdot t$); $W_V = 20\%$; $\rho = 1,80$ г/см³).

Таким чином, експериментальним шляхом підтверджено, що корегування показань нейтронного вологоміра шляхом внесення поправкового коефіцієнта, який визначають на щільність ґрунту природної вологості, підвищує точність і оперативність, знижує вартість виконання робіт по визначенню вологості ґрунту, поширює застосування методу на всю зону аерації (незалежно від її потужності). Слід відзначити, що поправковий коефіцієнт на щільність ґрунту за формулою (4) є однозначним для заданого горизонту досліджуваного ґрунту.

1. *Olgaard P. L.* On the theory of the neutronic method for measuring the water content soil. – Copenhagen, 1965. – 44 p. – Risö Rept., No 97.
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. ДСТУ ISO 10573-2001. Якість ґрунту. Визначення вмісту води в ненасиченій зоні. Метод глибинного нейтронного зонда. – Введ. 01.07.2003.

5. *Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Влагомер поверхностно-глубинный радиоизотопный ВПГР-1.* – Полтава: Изд-во “Полтава”, 1982. – 43 с.

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

Надійшло до редакції 12.10.2011

А. Ю. Кетов, С. А. Иващенко, С. Т. Звольский

Поправка на плотность грунта при определении его влажности нейтронными влагомерами

Експериментально підтверджена пропозована авторами поправка на плотність ґрунта при визначенні його вологості нейтронними вологомерами. Поправка робить можливим побудову єдиної градуировочної залежності для всього діапазону можливих змінень щільності ґрунта. Використання поправки на щільність ґрунта спрощує інтерпретацію показань нейтронного вологомера.

A. Ju. Ketov, S. O. Ivashchenko, S. T. Zvolsky

Correction factor on the density of soil at the determination of its moisture by neutron moisture gauges

The correction factor on the density of soil at the determination of its moisture by neutron moisture gauges, which was proposed by authors, is experimentally confirmed. The correction factor makes it possible to construct the common graduate relation for the whole range of possible changes of the soil density. The use of the correction factor simplifies the interpretation of the readings of neutron moisture gauges.