

УДК 631.432:626.86

**Матус С. К., к.т.н., доцент, Пастушенко В. Й., к.т.н., професор**  
(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

## **ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ГІДРОФІЗИЧНИХ ФУНКЦІЙ ҐРУНТІВ**

**У роботі запропоновані методика розрахунку вмісту вологи за величиною потенціалу ґрунтової вологи та ідентифікація основної гідрофізичної характеристики і методика визначення функції вологопровідності ґрунту на базі нейромережових технологій із застосуванням тензіометричних вологомірів.**

**Ключові слова:** вологість, ґрунт, гідрофізичні функції.

Здатність ґрунту проводити воду є важливим показником, необхідним для різних меліоративних розрахунків. Вивченням кількісних закономірностей переміщення вологи в ґрунті займалися А.М. Алпатьєв, А.Д. Воронін, А.М. Глобус, М.О. Муромцев, А.А.Роде, І.І. Судніцин та ін. [1-4].

Інформація про вологопровідність може бути використана для математичного (кількісного) аналізу різних випадків переміщення ґрунтової вологи, що відбувається в природних умовах: фільтрації води через ґрунт, надходження вологи від рівня ґрунтових вод до поверхні, поглинання вологи ґрунтом, надходження ґрунтової вологи до коріння рослин.

Так, використання рівняння вологопереносу для прогнозування руху вологи в зоні аерації передбачає наявність достовірної інформації про гідрофізичні властивості ґрунту, тим самим виникає необхідність у визначенні ряду функцій, які описують властивості ґрунтів утримувати і проводити ґрунтову вологу під дією термодинамічних сил та їх градієнтів. До таких функцій відносяться: функція водоутримання або основна гідрофізична характеристика (ОГХ), це залежність всмоктуючого тиску ґрунту від його вологості  $\psi(W)$  і функція вологопровідності ненасичених ґрунтів. ОГХ характеризує енергетичний стан вологи в ґрунті і безпосередньо пов'язана з його основними гідрофізичними і фізико-механічними властивостями. Із-за впливу гистерезиса вона неоднозначна для процесів осушення і зволоження. Говорячи про функцію вологопровідності, розрізняють характеристику вологопровіднос-

ті, що пов'язує коефіцієнт вологопровідності і потенціал ґрунтової вологи  $k(\psi)$  та характеристику, яка пов'язує коефіцієнт вологопровідності ґрунту і його вологість  $k(W)$ . Ці характеристики є відображенням будови порового простору ґрунту і тому пов'язані між собою. На основі уявлення про будову порового простору і феноменології руху вологи в порах ґрунту було багато спроб встановити аналітично зв'язок між цими характеристиками [2].

Універсальною функцією, що відображає вплив усіх факторів, які можуть впливати на енергетичний стан води в ґрунті, є потенціал вологи. Як відомо, вода переміщується завжди від більшого потенціалу до меншого. Діючою силою при цьому є градієнт вільної енергії або потенціалу ґрунтової вологи, що відображає сили, які викликають ізотермічний потік вологи. В ізотермічних умовах складовими потенціалу вологи є: капілярний тиск, осмотичні і гравітаційні сили. Внаслідок цього, гідравлічна провідність ненасичених вологою ґрунтів (капілярна провідність  $k$ , м/добу) характеризується не єдиним значенням (як при насиченому вологоперенесенні), а є функцією від всмоктуючого тиску  $k = k(\psi)$  або від вологості ґрунту  $k = k(W)$ .

З точки зору вологопровідності ґрунтовий профіль ділиться на дві частини: знизу – область повного насичення, де рух вільної вологи відбувається під впливом сили тяжіння, згідно законів фільтрації, а зверху – область з рухом вологи у ненасиченому ґрунті.

На практиці немає єдиного методу, який би дозволив одержати ОГХ  $\psi(W)$  в межах діапазону природної вологості. Для одержання такої залежності звичайно застосовують декілька експериментальних методів: тензіометричний – в діапазоні від 0 до 80 кПа; мембраного пресу або вимірювання в центрифугі – 0...1000 кПа [3, 5]; гігроскопічний – 3000...230000 кПа.

У діапазоні вологи від повної вологомісткості (ПВ) до 50-60% найменшої (НВ) основна роль у взаємодії води з твердою фазою ґрунту належить капілярно-сорбційним силам. Тому при контролі стану й доступності ґрунтової вологи для рослин нами розглядався тензіометричний метод, який реалізовувався за допомогою тензіометричних вологомірів.

Тензіометри прості за конструкцією і надійні в експлуатації. Але вони мають свої недоліки – необхідність постійної дозаправки водою та необхідність постійного перерахунку тиску на вологість ґрунту.

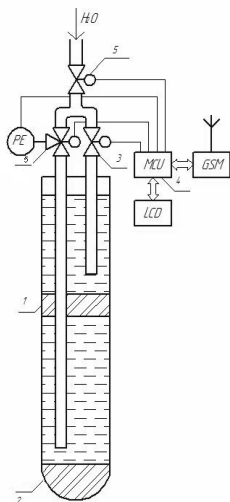


Рис. 1. Конструкція тензіометра з автоматичною дозаправкою:

- 1 – вимірювальний фільтр;
- 2 – підживлюючий фільтр;
- 3, 5 – двоходові електромагнітні клапани;
- 4 – мікропроцесорний пристрій;
- 6 – трьохходовий електромагнітний клапан

GSM-мережі.

При використанні тензіометрів, актуальною є задача розрахунку вологості за їх показами. Залежність всмоктуючого тиску ґрунту від його вологості  $\psi(W)$  чутлива до зміни механічного складу ґрунту. Так, в роботі [11] запропонована методика розрахунку вмісту води в ґрунті за величиною потенціалу (тиску) ґрунтової води при нормуванні ґрунтів за питомою поверхнею, але не враховується механічний склад ґрунтів, що вносить додаткову похибку, особливо в області високих вологостей. Тому, враховуючи викладене, *методика розрахунку*

Дослідженнями Інституту водних проблем і меліорації НААН України (ІВПіМ) [8] і ряду інших науковців [6, 7] встановлено, що використання тензіометрів для контролю вологості кореневого шару ґрунту забезпечує необхідну точність і оперативність порівняно з іншими методами.

Тому, запропоновано конструкцію тензіометра з автоматичною дозаправкою [9, 10], яка конструктивно складається із двокамерної пластикової труби із вимірювальним 1 та підживлюючим 2 керамічними фільтрами (рис. 1).

Розроблено програмне забезпечення для мікроконтролера, яке забезпечує в залежності від призначення датчика роботу в двох режимах: в режимі вимірювання вологості кореневого шару ґрунту з автоматичною дозаправкою або в режимі періодичного вимірювання на двох глибинах ґрунтового профілю.

Дані про всмоктуючий тиск ґрунту по безпроводному каналу зв'язку передаються на диспетчерський пункт. Пристрій має можливість передавати дані як по радіоканалу, так і з використанням

вмісту вологи за величиною потенціалу ґрунтової вологи передбачає, у відповідності до основного закону термодинаміки [12], використання аналітичної функціональної залежності між капілярним потенціалом (тиском)  $\Psi$  і вмістом вологи  $W$  в ґрунті різного механічного складу

$$\psi = -\left(\text{ctg}(\overline{W} + c) - d\right), \quad (1)$$

де  $\Psi$  – потенціал ґрунтової вологи (покази тензіометра, атм);  $\overline{W}$  – показник ґрунтової вологи, рад (табл. 1);  $c$  і  $d$  – параметри, що визначаються за експериментальними даними (табл. 2).

Таблиця 1

Показники ґрунтової вологи  $\overline{W}$ , рад при різних тисках

<i>Ґрунт</i>	<i>Тиск, атм</i>	
	<i>0,33</i>	<i>0,8</i>
1. Ґрунти легкосуглинистого механічного складу	0,99	0,67
2. Торфові ґрунти	1,00	0,68
3. Дерново-підзолисті глеєві ґрунти супіщаного механічного складу	0,99	0,7

Виходячи з цих міркувань, проведені розрахунки коефіцієнтів рівняння (1)  $c$  і  $d$ , для кожного ґрунту (табл. 2), використовуючи системи рівнянь

$$\begin{cases} 0,33 = \text{ctg}(0,99 + c) + d \\ 0,8 = \text{ctg}(0,67 + c) + d \end{cases} \quad \begin{cases} 0,33 = \text{ctg}(1,00 + c) + d \\ 0,8 = \text{ctg}(0,68 + c) + d \end{cases} \quad \begin{cases} 0,33 = \text{ctg}(0,99 + c) + d \\ 0,8 = \text{ctg}(0,70 + c) + d \end{cases} . \quad (2)$$

Таблиця 2

Коефіцієнти рівняння для різних типів ґрунтів

<i>Ґрунт</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
1. Ґрунти легкосуглинистого механічного складу	0,1554	0,1231
2. Торфові ґрунти	0,1762	0,1174
3. Дерново-підзолисті глеєві ґрунти супіщаного механічного складу	0,0712	0,2289

За цією методикою, при використанні тензіометрів, значення вологості розраховуємо за формулою

$$W = (W_{0,33} - W_{15}) \cdot (\text{arccctg}(\psi + c) - d) + W_{15}, \quad (3)$$

де  $c, d$  – параметри рівняння, що визначаються за експериментальними даними, наведені в табл. 2;  $W_{0,33}$  і  $W_{15}$  – вологості ґрунту при тис-

ках відповідно рівних 15 атм і 0,33 атм (використовувалися експериментальні дані ОГХ для досліджуваних ґрунтів в інтервалі від низьких до високих значень вологості).

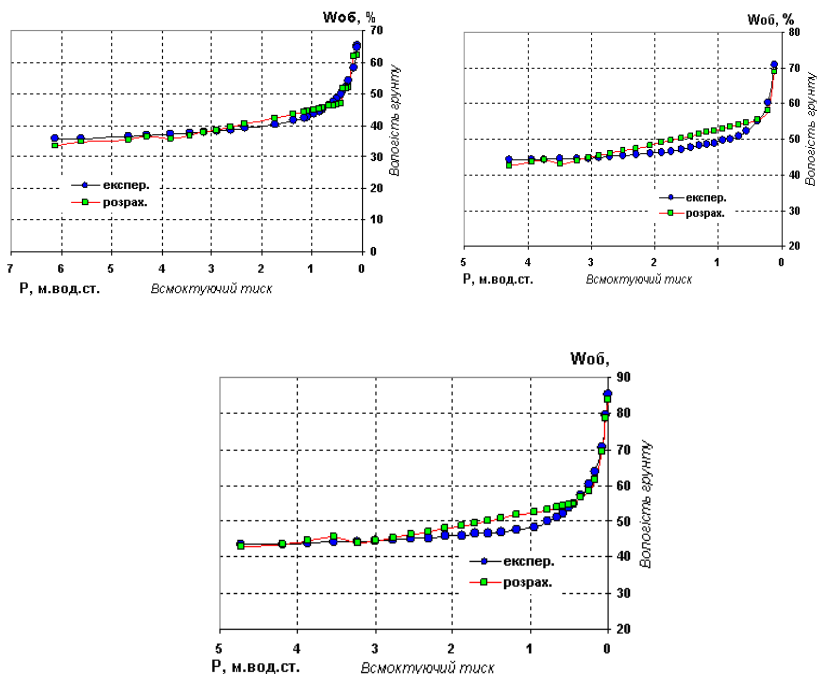


Рис. 2. Залежність всмоктуючого тиску ґрунту від його вологості (торфові ґрунти) для різних горизонтів:  
а) 0...0,3 м; б) 0,3...0,5 м; в) 0,5...1,0 м

Таблиця 3

Результати розрахунку вмісту води за величиною потенціалу ґрунтової води для торфового ґрунту (тензіометричний діапазон від 0...1 атм або 0...10 м.в.ст.)

Торфовий ґрунт		
Середньоквадратичне відхилення		
0,05...0,25 м	0,3...0,5 м	0,6...0,9 м
1,761	2,312	2,084

Для визначення коефіцієнта вологопровідності використовують стаціонарні і нестаціонарні методи [2]. *Стаціонарні методи* більш прості, але їх використання обмежується вузьким інтервалом значень

величини коефіцієнта вологопровідності. Крім того основним їх недоліком є тривалість експеримента, яка квадратично зростає із довжиною зразка. До стаціонарних відносимо методи, що реалізуються за допомогою потокомірів і колон [2, 3]. Основними труднощами при використанні даних методів є експериментальне визначення вологості і потоків вологи за профілем ґрунту. *Нестаціонарні методи* потребують менших затрат часу експериментатора у порівнянні зі стаціонарними, але достовірність і точність отриманих даних залежить від того, наскільки умови досліду відповідали цілому ряду теоретичних припущень.

Складна природа залежності ґрунту з водою у вигляді "вологість – потенціал – вологопровідність" найчастіше представляється у вигляді емпіричних формул та графіків. Запропоновано багато емпіричних апроксимаційних формул для функції вологопровідності, які з певною точністю відтворюють цю функцію на окремих інтервалах. Найбільш відомими є формули Ван Генухтена (1980), Муалема (1976), Брукса і Корі, Гарднера, Уїнстона, К.П. Лундіна, С.Ф. Авер'янова, В.А. Бодрова, А.І. Будаговського.

У даній роботі коефіцієнт вологопровідності визначався за емпіричними формулами Ван Генухтена, Авер'янова, Лундіна, Уїнстона. Розрахунки проводились для дерново-підзолистих та торфових ґрунтів, табл. 4.

Таблиця 4

Результати розрахунку коефіцієнта вологопровідності ґрунту за емпіричними формулами

№	Формула	Дерново-підзолистий ґрунт			Торфовий ґрунт		
		Середньоквадратичне відхилення			Середньоквадратичне відхилення		
		0,05...0,3 м	0,4...0,7 м	0,8...1,5 м	0,05...0,25 м	0,3...0,5 м	0,6...0,9 м
1.	Ван Генухтена	0,204	0,378	0,360	0,179	0,203	0,208
2.	Авер'янова	0,406	0,511	0,703	0,462	0,612	0,901
3.	Лундін, Ганчарік, Паккевич	-	-	-	0,533	0,943	1,784
4.	Уїнстона	1,012	0,973	2,622	2,241	2,927	3,773

Згідно результатів порівняння з дослідними даними найкращі результати апроксимації показали емпіричні формули Ван Генухтена і Авер'янова.

На даній час виникла і активно розвивається область рішення задач, що пов'язані з прогнозуванням, моделюванням і контролем ґрунтових властивостей, за допомогою програмних комп'ютерних засобів.

Останні засновані на принципах нечіткої логіки (fuzzy logic), теорії неймовірності, генетичних алгоритмів і штучних нейронних мереж. Проблема використання нейронних мереж для ідентифікації гідрологічних і водно-фізичних властивостей ґрунтів розглянуті багатьма дослідниками [13-16]. Так наприклад, штучні нейронні мережі були використані Шаапом [16] для знаходження параметрів рівняння Ван-Генухтена.

Отже, у роботі поставлено задачу розробки альтернативної методики розрахунку коефіцієнта вологопровідності ґрунту  $k(W)$  на базі нейронних мереж. Головною складовою методики є розрахунок коефіцієнта вологопровідності ґрунту на базі нейромережових технологій. Суть розрахунку зводиться до визначення коефіцієнта вологопровідності ґрунту за допомогою багатошарової нейронної мережі на основі вхідних параметрів, якими є всмоктуючий тиск (потенціал) ґрунту або його вологість, які отримують за допомогою тензіометричних вологомірів.

Для цього створимо мережу виду

$$k = NN(W, \psi), \quad (4)$$

де  $W$  – значення вологості ґрунту, % об.;  $\psi$  – значення всмоктуючого тиску ґрунту, м;  $NN$  – перетворення нейронної мережі.

У ході проведених досліджень виявлено, що найкращу точність показала багатошарова нейромережа, мережа з радіальними базисними елементами, узагальнено-регресійна та мережа з радіальними базисними елементами з нульовою помилкою.

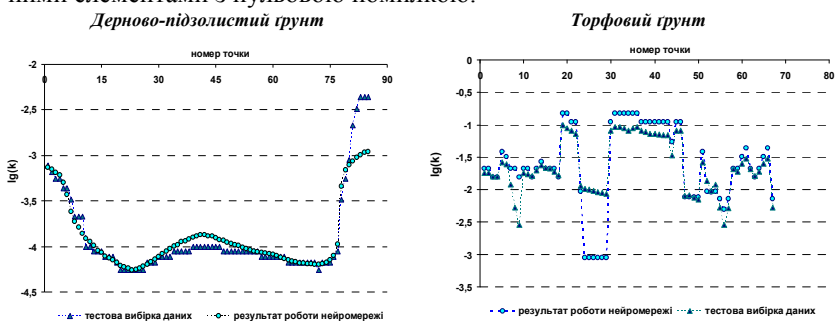


Рис. 3. Результати розрахунку коефіцієнта вологопровідності ґрунту за допомогою багатошарової НМ на тестовій вибірці даних

Отже, запропоновані методика розрахунку вмісту вологи за величиною потенціалу ґрунтової вологи, яка передбачає, у відповідності до основного закону термодинаміки, використання аналітичної функціональної залежності між капілярним потенціалом і вмістом вологи в

грунті різного механічного складу та *методика розрахунку коефіцієнта вологopровідності ґрунту на базі нейронних мереж*, її головною складовою є розрахунок коефіцієнта вологopровідності на основі вхідних параметрів, якими є всмоктуючий тиск (потенціал) ґрунту або його вологість, які отримують за допомогою тензіометричних вологомірів. Тим самим, забезпечуючи високу точність і оперативність достовірної інформації про гідрofізичні властивості ґрунту.

1. Воронин А. Д. Основы физики почв: учеб. пособие / А. Д. Воронин – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1986. – 244 с.
2. Глобус А. М. Почвенно-гидрофизическое обеспечение агроэкологических математических моделей: Монография / А. М. Глобус – Л. : Гидрометеиздат, 1987. – 427 с.
3. Муромцев Н. А. Мелиоративная гидрофизика почв / Н. А. Муромцев – Л. : Гидрометеиздат, 1991. – 265 с.
4. Судницын И. И. Движение почвенной влаги и водопотребление растений / И. И. Судницын – М. : МГУ, 1979. – 254 с.
5. Смагин А. В. Определение основной гидрофизической характеристики почв методом центрифугирования / А. В. Смагин, Н. В. Садовникова, Мизури Маауиа Бен Али // Почвоведение. – 1998. – М. : Наука. – № 11. – С. 1362–1370.
6. Пастушенко В. Й. Розробка мікропроцесорної системи вимірювання потенціалу ґрунтової вологи / В. Й. Пастушенко, С. К. Матус // Меліорація і водне господарство: Зб. наук. праць. – Київ : Аграрна наука. – Вип. № 93-94. – С. 235–242.
7. Пастушенко В. Й. Технічні засоби дистанційного моніторингу на керованих модулях осушувально-зволожувальних систем / В. Й. Пастушенко, С. К. Матус, С. В. Шатний // Вісник інженерної академії України. – 2012. – Київ : – Вип. № 1. – С. 87–91.
8. Рекомендації з оперативного контролю та управління режимом зрошення сільськогосподарських культур із застосуванням тензіометричного методу / М. І. Ромашенко, В. М. Корюненко, М. М. Муромцев – К. : ІВПіМ, 2012. – 71 с.
9. Патент на корисну модель 00073 Україна, 7 G01N 33/24. Тензіометр з автоматичною дозаправкою / В. Й. Пастушенко, С. К. Матус, В. П. Червінко (Україна). – № 8038; 15.07.2005. – Бюл. № 7.
10. Патент на корисну модель 08687 Україна, G01N 33/24 (2006.01). Тензіометр для експрес-аналізу вологості ґрунту / С. В. Шатний, С. К. Матус (Україна). – № 66701; 10.01.2012. – Бюл. № 1.
11. Баховец Б. А. Унификация тарирования тензиометрических влагомеров для почв различного механического состава / Б. А. Баховец, Г. П. Горюнов, В. И. Пастушенко, Я. В. Ткачук // Почвоведение. – 1979. – М. : Наука. – № 5. – С. 117–120.
12. Степанов Л. И. Соотношение между капиллярным потенциалом (давлением) и количеством почвенной влаги / Л. И. Степанов // Почвоведение. – 1979. – М. : Наука. – № 5. – С. 57–63.
13. Mualem Y. A. New model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media / Y. A. Mualem // WRR. – 1976. – V. 12, N 3. – P. 513–522.
14. Pachepsky Ya. A., Timlin D., Varallyay G. Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data / Ya. A. Pachepsky, D. Timlin, G. Varallyay // Soil. Sci. Soc. Am. J. – 1996. – V. 60. – P. 727–733.
15. Rahman M. S., Wang J., Deng W., Carter J. P. A Neural Network Model for the Uplift Capacity of



Suction Caissons / M. S. Rahman, J. Wang, W. Deng, J. P. Carter // Computers and Geotechnis. – 2001. – № 28. – P. 269–287. 16. Schaap M. G., Bouten W. Modeling water retention curves of sandy soils using neural networks / M. G. Schaap, W. Bouten // Water Resour. Res. – 1996. – V.32. – P. 3033–3040.

Рецензент: д. т. н., професор Древецький В. В. (НУВГП)

---

**Matus S. K., Candidate of Engineering, Associate Professor,  
Pastushenko V. Y., Candidate of Engineering, Associate Professor,**  
(National University of Water Management and Nature Resources Use,  
Rivne)

### **MOISTURE MEASUREMENT AND HYDROPHYSICAL FUNCTIONS IDENTIFICATION OF SOILS**

**In this paper the method for calculation the moisture content by the value of soil moisture potential has been proposed. It was also suggested the identification technique of the basic hydrophysical characteristics and methods for measurement of soil water permeability function based on neural network technologies using tensiometric moisture meters.**

**Keywords:** moisture, soil, hydrophysical functions.

---

**Матус С. К., к.т.н., доцент, Пастушенко В. Й., к.т.н., професор**  
(Национальный университет водного хозяйства и природопользования,  
г. Ровно)

### **ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ПОЧВ**

**В работе предложены методика расчета влажности за величиной потенциала почвенной влаги, идентификация основной гидрофизической характеристики и методика определения функции влагопроводности почвы на базе нейросетевых технологий с использованием тензиометрических влагомеров.**

**Ключевые слова:** влажность, почва, гидрофизические функции.

---