

Л. І. Леві, М. К. Бороздін, О. Є. Зима

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна

## ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ КОЕФІЦІЄНТА ВОЛОГОПРОВІДНОСТІ ҐРУНТУ

**Анотація.** Інформація про вологопровідність може бути використана для математичного (кількісного) аналізу різних випадків перенесення ґрунтової вологи, що відбуваються в природних умовах. Сюди входить фільтрація води в ґрунті, потік води від рівня ґрунтових вод до поверхні, поглинання ґрунтової вологи та потік ґрунтової вологи до коренів рослин. Універсальною функцією, яка відображає вплив усіх факторів, що можуть впливати на енергетичний стан води в ґрунті, є водний потенціал. Як відомо, вода завжди рухається від більш високого потенціалу до більш низького. Діюча сила – це вільна енергія або градієнт водного потенціалу ґрунту, який відображає силу, що викликає ізотермічний потік води. В ізотермічних умовах компонентами водного потенціалу є капілярний тиск, осмотичні сили та сила тяжіння. В результаті, вологопровідність ненасичених ґрунтів не характеризується єдиним значенням (як у випадку транспорту насиченої води), а скоріше є функцією тиску всмоктування або вологості ґрунту. Комплексний характер залежності ґрунту і води в термінах «волога – потенційна енергія – провідна вологість» часто подається у вигляді емпіричних формул і графіків. Було запропоновано багато емпіричних формул для апроксимації функції вологопровідності, які відтворюють цю функцію через певні проміжки часу з певною точністю. В даний час актуальним є завдання розробки технологій, що забезпечують економічну та екологічну ефективність регулювання води в системах осушення та зволоження. У зв'язку з цим необхідно створити повну математичну модель ґрунту на основі рівняння вологопереносу, одним із основних параметрів якого є коефіцієнт вологопровідності. Метою статті є розробка нового методу визначення параметра водопровідності ненасиченої зони ґрунту на основі прямої багатозарової статичної штучної нейронної мережі, що сприяє підвищенню точності вимірювання. Коефіцієнт вологопровідності, який описує фізичні процеси в ґрунті, можна визначити за допомогою ряду емпіричних формул, які містять емпіричні коефіцієнти. Альтернативним методом є використання нейронної мережі, за допомогою якої на основі досліджуваного зразка визначається коефіцієнт вологопровідності або будь-який інший параметр ґрунту, залежно від експериментальних даних, встановлений на досить високе значення. точність. Нейронну мережу, навчену на навчальному наборі даних, можна успішно використовувати на незалежних тестових зразках для конкретного типу ґрунту, який не входить до навчального набору.

**Ключові слова:** диференціальне рівняння вологопереносу, коефіцієнт вологопровідності, функції активації прихованого шару нейромережі, навчання нейронної мережі.

### Вступ

**Постановка проблеми.** При застосуванні диференціального рівняння водного транспорту необхідно визначити коефіцієнти і функції, які є параметрами цього рівняння, та описати фізичний процес водного транспорту. Ці ознаки включають функцію водоутримання або основні гідрофізичні властивості, а саме залежність тиску всмоктування ґрунту від вмісту води  $\psi(W)$ , а також функцію водопровідності ненасичених ґрунтів.

У функції вологопровідності розрізняють характеристичну криву вологопровідності, що зв'язує коефіцієнт вологопровідності і потенціал вологості ґрунту  $k(\psi)$ , і характеристичну криву, що зв'язує коефіцієнт вологопровідності ґрунту та його вологоємність. Вміст  $k(W)$ . Водопровідна здатність ґрунту є важливим показником у різноманітних розрахунках полігонів [1-5].

Інформація про вологопровідність може бути використана для математичного (кількісного) аналізу різних випадків переміщення ґрунтової вологи, що відбувається у природних умовах. До таких випадків переміщення слід віднести:

- фільтрацію води через ґрунт,
- надходження вологи від рівня ґрунтових вод до поверхні,
- поглинання вологи ґрунтом,
- надходження ґрунтової вологи до коріння рослин.

Універсальною функцією, яка відображає вплив усіх факторів, які можуть впливати на енергетичний стан води в ґрунті, є водний потенціал.

Інформація про вологопровідність може бути використана для математичного (кількісного) аналізу різних випадків руху ґрунтової вологи, що відбуваються в природних умовах. Сюди входять:

- фільтрація води в ґрунті,
- потік води від рівня ґрунтових вод до поверхні,
- поглинання ґрунтової вологи,
- потік ґрунтової вологи до коренів рослин.

Водний потенціал є універсальною функцією, яка відображає вплив усіх факторів, що можуть впливати на енергетичний стан води в ґрунті. Як відомо, вода завжди рухається від вищого потенціалу до нижчого. Ефективна сила – це градієнт вільної енергії або потенційний градієнт вологості ґрунту і відображає силу, яка викликає ізотермічний потік вологи. В ізотермічних умовах складовими водного потенціалу є: капілярний тиск, осмотична сила, сила тяжіння. В результаті гідравлічна провідність (капілярна провідність  $k$ , см/добу) ненасичених ґрунтів є не єдиною величиною (як у випадку транспортування насиченої води), а скоріше тиском всмоктування  $k = k(\psi)$  або вологістю ґрунту  $k = k(W)$  [1 – 5].

За вологопровідністю ґрунтовий профіль можна розділити на дві частини. Знизу – ділянки повного насичення, де рух вільної води відбувається під дією сили тяжіння за законами фільтрації, а

зверху - ділянки, де відбувається рух води в ненасичених ґрунтах.

Найпоширенішим методом визначення  $k(W)$  є експериментальний метод, що базується на аналізі даних про міграцію вологи. Досягти стаціонарної течії не завжди технічно просто, а експерименти займають багато часу. Нестационарні методи вимагають від експериментатора менше часу, ніж стаціонарні, але надійність і точність отриманих даних залежить від того, наскільки умови експерименту задовольняють ряд теоретичних припущень.

Найпоширенішим методом визначення  $k(W)$  є експериментальний метод, заснований на аналізі даних водного транспорту: методи стаціонарного та нестационарного потоків. З технічної точки зору досягти умов сталого потоку не завжди легко, і такі експерименти також займають значну кількість часу. Хоча перехідні методи вимагають від експериментатора менше часу, ніж методи стаціонарного режиму, надійність і точність отриманих даних залежить від того, наскільки умови експерименту відповідають ряду теоретичних припущень.

Комплексний характер залежності ґрунт-вода у вигляді «вологопотенціал-вологопровідність» найчастіше виражається у вигляді емпіричних формул і діаграм. Для функції провідності води було запропоновано багато емпіричних наближень, які відтворюють цю функцію з певною точністю на певній відстані. В даний час актуальним є завдання розробки технологій, що забезпечують економічну та екологічну ефективність кондиціонування води в системах осушення та зволоження. У зв'язку з цим необхідно розробити відповідну математичну модель ґрунту на основі рівняння переносу води. Його основним параметром є вологопровідність.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Кількісна оцінка потоку води залежить від умов, за яких вода рухається в ґрунті. Ґрунт насичений водою, якщо пори повністю заповнені водою, а ґрунт ненасичений водою, якщо лише частина пори заповнена водою, а інша частина заповнена повітрям. Характер руху вологи в насичених пористих середовищах під дією гідростатичного тиску можна пояснити відомим законом Дарсі, який стверджує, що швидкість руху вологи пропорційна градієнту тиску води. Тиск води є єдиною силою, яка переміщує воду в насичених ґрунтах, і її легко виміряти.

У міру того, як ґрунти переходять від насичених умов до ненасичених, моделі, які контролюють водний баланс і рух, стають значно складнішими. Характер руху води в таких ґрунтах сильно відрізняється від руху рідини в умовах фільтраційного потоку.

Особливістю цього руху є те, що межі течії не залишаються постійними, пори частково заповнені, і вміст води в ґрунті може стати нерівномірним у різних місцях однорідного ґрунту. Вода може рухатися не тільки у вигляді безперервного (об'ємного) потоку, а й у вигляді мембрани, що покриває поверхню частинок ґрунту і тече під капілярним тиском меніска. Ці особливості доводять, що про-

відність води може змінюватися як у просторі, так і в часі.

Універсальною функцією, що відображає вплив всіх факторів, які можуть впливати на енергетичний стан води в ґрунті, є потенціал вологи. Як відомо, вода (так само як тепло і електричний струм) переміщується завжди від більшого потенціалу до меншого. Діючою силою при цьому буде градієнт вільної енергії або потенціалу ґрунтової вологи, що виражає сили які викликають ізотермічний потік вологи.

В ізотермічних умовах складовими потенціалу вологи є:

- капілярний тиск,
- осмотичні і гравітаційні сили.

Універсальною функцією, яка відображає вплив усіх факторів, які можуть впливати на енергетичний стан води в ґрунті, є водний потенціал. Як відомо, вода (як тепло та електричний струм) завжди рухається від вищого потенціалу до нижчого. Ефективною силою в цьому випадку є градієнт вільної енергії або потенціал вологості ґрунту, який представляє силу, що викликає ізотермічний потік води.

В ізотермічних умовах складовими водного потенціалу є: капілярний тиск, осмотична сила, сила тяжіння

Внаслідок цього, гідравлічна провідність ненасичених вологою ґрунтів (капілярна провідність  $k$ , см/добу) характеризується не єдиним значенням (як при насиченому вологопереносі), а обов'язково функцією від всмоктуючого тиску  $k = k(\psi)$ , або від вологості ґрунту  $k = k(W)$ .

Таким чином, якщо припустити, що гідравлічна провідність ґрунту є функцією об'ємного вмісту вологи в ґрунті  $k = k(W)$ , то рух води у ненасичених ґрунтах також відбувається згідно закону Дарсі. У результаті вологопровідність (капілярна провідність  $k$ , см/добу) ненасичених водою ґрунтів не характеризується одним значенням (як у випадку переносу насиченої води), а обов'язково є функцією тиску  $k = k(\psi)$  або вміст води в ґрунті  $k = k(W)$ . Тому рух води в ненасичених ґрунтах також відбувається за законом Дарсі, припускаючи, що гідравлічна провідність ґрунту є функцією об'ємного вмісту води в ґрунті  $k = k(W)$ .

На величину коефіцієнта провідності води  $k$  впливає багато факторів. Це механічний і агрегатний склад ґрунту, структура, вологість, тиск (потенціал) всмоктування. У зв'язку з цим в даний час не існує теоретичного способу визначення  $k$ , його значення визначається математично на основі спеціальних експериментальних даних і даних спостережень.

Найпоширеніший метод визначення  $k$  базується на аналізі даних водного транспорту. Це метод сталого потоку та метод нестационарного потоку. Хоча ці методи прості, їх використання обмежене вузьким діапазоном значень  $k$ . Крім того, найбільшим недоліком є довший експериментальний час, який збільшується з квадратом довжини зразка ґрунтового моноліту. Цей спосіб реалізуєть-

ся за допомогою витратоміра і колонки. Застосування цих рівнянь потребує багато додаткової інформації про фізико-механічні властивості ґрунту та фізичні властивості води, що вимагає проведення великої кількості додаткових експериментів для отримання цієї інформації.

До основних гідрофізичних властивостей ґрунту належать:

залежність тиску всмоктування від об'ємної вологості ґрунту,

залежність вологопровідності від тиску всмоктування ґрунту,

залежність вологопровідності від об'ємної вологості ґрунту.

**Формулювання мети статті.** Розробка нового методу параметричної ідентифікації коефіцієнта вологопровідності ненасичених зон ґрунту на основі статичної багатоварової штучної нейронної мережі прямого розповсюдження з метою підвищення точності його визначення є метою даної статті.

### Основна частина

Розробимо альтернативну модель для розрахунку коефіцієнта вологопровідності ґрунту  $k$  на базі нейронних мереж. Для цього створимо мережу виду:

$$k = NN(W),$$

де  $W$  – значення вологості ґрунту;  $NN$  – перетворення нейронної мережі.

Вивчимо вплив типу функції активації прихованого шару нейронної мережі на точність її роботи. Для цього побудуємо двошарову нейронну мережу з наступними параметрами [1 – 5]:

кількість нейронів у першому шарі – 1,

кількість нейронів у другому шарі – 1,

функція активації нейронів другого шару – лінійна ('purelin'),

метод навчання - Левенберга-Марквардта ('trainlm'),

функція регулювання ваг і переміщень – градієнт з інерційною складовою ('learngdm'),

функція помилки – квадратична ('mse').

Дослідимо, яким чином тип функції активації прихованого шару нейронної мережі впливає на точність її роботи. Для цього створимо двошарову нейронну мережу з такими параметрами:

кількість нейронів у першому шарі дорівнює одному,

кількість нейронів у другому шарі дорівнює одному,

функція активації нейронів у другому шарі є лінійною ('purelin'),

метод навчання є методом Левенберга-Марквардта ('trainlm'),

функції коригування ваги та переміщення є градієнтами з інерційною складовою ('learngdm'),

функція похибки є квадратичною функцією ('mse') [1 – 5].

Згідно з результатами дослідження, найкраща точність нейронних мереж досягається за допомогою сигмоїдної (логістичної) і тангенціальної функцій активації нейронів прихованого шару. Мережі

з радіальними базисними функціями для активації нейронів прихованого шару дещо відрізняються точністю.

Дослідимо, яким чином кількість нейронів у прихованому шарі нейронної мережі впливає на точність її роботи. Для цього побудуємо двошарову нейронну мережу з такими параметрами:

кількість нейронів у першому шарі є змінною,

функція активації нейронів у першому шарі сигмоподібна ('logsig'),

кількість нейронів у другому шарі дорівнює одному,

функція активації нейронів у другому шарі є лінійною ('purelin'),

методом навчання є метод Левенберга-Марквардта ('trainlm'),

функцією коригування ваги та переміщення є градієнт з інерційним компонентом ('learngdm'),

функцією помилки є квадратична функція ('mse').

Будемо змінювати кількість нейронів прихованого шару від 1 до 20 і проаналізуємо точність мережі на вибірці тестових даних.

Дослідження показують, що чотирьох нейронів у прихованому шарі нейронної мережі достатньо. Збільшення кількості нейронів істотно не покращує точність нейронної мережі та сповільнює швидкість її навчання. Тому збільшувати кількість нейронів прихованого шару понад чотири не рекомендується.

Дослідимо вплив функції активації нейронів прихованого шару нейронної мережі на точність її роботи. Для цього побудуємо двошарову нейронну мережу з такими параметрами:

кількість нейронів у першому шарі дорівнює чотирьом,

кількість нейронів у другому шарі дорівнює одному,

функція активації нейронів у другому шарі є лінійною ('purelin'),

методом навчання є метод Левенберга-Марквардта ('trainlm'),

функція, яка встановлює ваги та переміщення, є градієнтом з інерційною складовою ('learngdm'),

функція помилки є квадратичною функцією ('mse').

Результати показують, що точність роботи нейронних мереж із сигмоподібною, радіальною базисною та тангенціальною функціями активації підвищується при збільшенні кількості нейронів прихованого шару, тоді як значення СКВ трьох мереж практично однакові. Мережі з лінійними функціями активації не підвищили свою точність. Результати показують, що точність зростає зі збільшенням кількості нейронів прихованого шару нейронних мереж із сигмоїдальною, радіально-основною та тангенціальною функціями активації, але СКВ трьох мереж майже однаковий. Мережі з лінійними функціями активації не підвищили свою точність.

Дослідимо, яким чином збільшення кількості шарів нейронів впливає на точність нейронної ме-

режі. Для цього побудуємо тришарову нейронну мережу з такими параметрами:

кількість нейронів у першому шарі дорівнює чотирьом,

функція активації нейронів у першому шарі є сигмоподібною ('logsig'),

кількість нейронів у другому шарі дорівнює числу  $n$ ,

функція активації нейронів у другому шарі є сигмоподібною ('logsig'),

кількість нейронів у третьому шарі дорівнює одному,

функція активації нейронів третього шару є лінійною ('purelin'),

методом навчання є метод Левенберга-Марквардта ('trainlm').

функція налаштування ваг і зміщень є градієнтною з інерційною складовою ('leamgdm'),

функція помилки є квадратичною функцією ('mse').

Відповідно до результатів дослідження, введення другого прихованого шару не покращує якість нейронної мережі. Завдяки збільшенню кіль-

кості нейронів у прихованому шарі, нейронні мережі з сигмоподібною, радіальною та тангенціальною функціями активації покращили свою точність, тоді як значення СКВ для всіх трьох мереж були майже однаковими. Мережа з лінійною функцією активації не покращує свою точність.

### Висновки

Коефіцієнт вологопровідності, який описує фізичні процеси в ґрунті, можна визначити за допомогою ряду емпіричних формул, які містять емпіричні коефіцієнти.

Альтернативним методом є використання нейронної мережі, за допомогою якої на основі досліджуваного зразка визначається коефіцієнт вологопровідності або будь-який інший параметр ґрунту, залежно від експериментальних даних, встановлений на досить високе значення точності.

Нейронну мережу, навчену на певному навчальному наборі даних, можна успішно використовувати на незалежних тестових зразках для конкретного типу ґрунту, який не входить до навчального набору.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ямпольський Л.С. Нейротехнології та нейросистеми: [монографія]. К.: – Дорадо-Друк, 2015. – 508 с.
2. Леві Л.І. Керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при крапельному зволоженні на основі нечіткої логіки. // Збірник наукових праць: Системи управління, навігації та зв'язку Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» / - №2 (60), 2020. – С. 27 – 30.
3. Schmidhuber J. Deep Learning in Neural Networks: An Overview // Neural Networks. – 2015. – Vol. 61. – P. 85–117.
4. Леві Л.І. Інтелектуальні інформаційні технології в ідентифікації і керуванні складними технічними об'єктами в умовах невизначеності: [монографія]. – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2021. – 194 с.
5. Субботін С.О. Нейронні мережі: навчальний посібник / С.О. Субботін, А.О. Олійник; під заг. ред. проф. С.О. Субботіна. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. – 132 с.

Received (Надійшла) 04.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 08.11.2023

### Application of neuronnetwork technologies for the identification of the moisture conductivity coefficient of the soil

L. Lievi, M. Borozdin, O. Zyma

**Abstract.** Information on moisture conductivity can be used for mathematical (quantitative) analysis of various cases of soil moisture transfer occurring in natural conditions. This includes soil water filtration, water flow from the water table to the surface, soil moisture uptake, and soil moisture flow to plant roots. Water potential is a universal function that reflects the influence of all factors that can affect the energy state of water in the soil. As you know, water always moves from a higher potential to a lower one. The active force is the free energy or soil water potential gradient that represents the force that causes isothermal water flow. In isothermal conditions, the components of the water potential are capillary pressure, osmotic forces, and gravity. As a result, the moisture conductivity of unsaturated soils is not characterized by a single value (as in the case of saturated water transport), but rather is a function of suction pressure or soil moisture. The complex nature of the dependence of soil and water in terms of "moisture - potential energy - conductive moisture" is often presented in the form of empirical formulas and graphs. Many empirical formulas have been proposed to approximate the moisture conductivity function, which reproduce this function at certain time intervals with a certain accuracy. Currently, the task of developing technologies that ensure the economic and ecological efficiency of water regulation in drainage and humidification systems is relevant. In this regard, it is necessary to create a complete mathematical model of the soil based on the moisture transfer equation, one of the main parameters of which is the moisture conductivity coefficient. The purpose of the article is to develop a new method for determining the water conductivity parameter of the unsaturated zone of the soil based on a direct multilayer static artificial neural network, which contributes to increasing the accuracy of the measurement. The coefficient of moisture conductivity, which describes the physical processes in the soil, can be determined using a number of empirical formulas that contain empirical coefficients. An alternative method is the use of a neural network, with the help of which the coefficient of moisture conductivity or any other parameter of the soil, depending on the experimental data, is set to a sufficiently high value based on the studied sample. precision. A neural network trained on the training data set can be successfully used on independent test samples for a specific soil type that is not included in the training set.

**Keywords:** differential equation of moisture transfer, coefficient of moisture conductivity, activation functions of the hidden layer of the neural network, learning of the neural network.