

УДК 631.432:626.86

С.К. Матус
В.Й. Пастушенко, к.т.н.

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ КОЕФІЦІЄНТА ВОЛОГОПРОВІДНОСТІ ГРУНТУ НА БАЗІ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне,
e-mail: matus_sv@ukr.net, vteren@gmail.com

У роботі розроблено методику визначення функції вологопровідності ґрунту на базі нейромережевих технологій, побудовано та проаналізовано роботу нейромереж різної архітектури, здійснено порівняння їх роботи з результатами визначення коефіцієнта вологопровідності за аналітичними формулами та з експериментальними даними.

Ключові слова: коефіцієнт вологопровідності, вологість, всмоктуючий тиск ґрунту, нейронна мережа, статистичні параметри.

Вступ

В меліоративному землеробстві актуальною є задача удосконалення технологій, які забезпечують економічну та екологічну ефективність водорегулювання на меліоративних осушувально-зволожувальних системах. Синтез алгоритмів управління в автоматизованих системах керування вологозабезпеченням на осушувальних землях здійснюється з використанням адекватної математичної моделі вологопереносу в ґрунті. При застосуванні в якості такої моделі диференційного рівняння вологопереносу виникає необхідність визначення коефіцієнтів і функцій, які є параметрами цього рівняння та описують фізичні процеси переносу вологи [1]. До таких функцій відносимо функцію водоутримання або основну гідрофізичну характеристику (ОГХ) $\psi(W)$ і функцію вологопровідності ненасичених ґрунтів. Говорячи про функцію вологопровідності розрізняють характеристику вологопровідності, що пов'язує коефіцієнт вологопровідності і потенціал ґрунтової вологи $k(\psi)$ та характеристику яка пов'язує коефіцієнт вологопровідності ґрунту і його вологість $k(W)$ [2].

Аналіз досліджень і публікацій

Здатність ґрунту проводити воду є важливим показником, необхідним для різних меліоративних розрахунків. Вивченням кількісних закономірностей переміщення вологи в ґрунті займалися Алпат'єв А.М., Воронін А.Д., Глобус А.М., Муромцев М.О., Роде А.А., Судніцин І.І. та інші. Інформація про вологопровідність може бути використана для математичного (кількісного) аналізу різних випадків переміщення ґрунтової вологи, що відбувається в 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, рис. 1.



Рис. 1. Схематичний вигляд переміщення ґрунтової вологи в природі.

Універсальною функцією, що відображає вплив всіх 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 буде 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 вологопереносі), а функцією від всмоктуючого тиску $k = k(\psi)$, або від вологості ґрунту $k = k(W)$.

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

Вологопровідність ненасичених *мінеральних ґрунтів* вивчали С.Ф. Авер'янов, С.І. Долгов, Гарднер, Чайлдс, М.В. Чураєв, І.І. Судніцин, вологопровідність *торфу* – В.Ф. Шебеко, Г.І. Афанасік, А.І. Фінський, С.С. Корчунов. Аналіз даних по вологопровідності для різних ґрунтів зручно робити на основі взаємозв'язку k з головними факторами, які визначають його: з потенціалом вологи, з однієї сторони, та вологістю ґрунту, з іншої. Потенціал вологи є еквівалентом глибини осушення і визначається положенням точки в зоні аерації по відношенню до рівня ґрунтових вод. З іншої сторони, вологість ґрунту є основним показником її зволоженості, загальних вологозапасів, доступності вологи рослинами. Причиною різкого зменшення вологопровідності при зменшенні вологості ґрунту є особлива будова (геометрія) порового простору та характер руху води в капілярах.

Найбільш розповсюдженими методами визначення $k(\psi)$ є експериментальні методи, які базуються на аналізі даних про рух вологи: методи стаціонарного і нестаціонарного потоків [6]. Реалізувати стаціонарний режим потоку не завжди легко з технічної точки зору, а крім того, такі досліди вимагають значних затрат часу. Нестаціонарні методи потребують менших затрат часу експериментатора в порівнянні зі стаціонарними, але достовірність і точність отриманих даних залежить від того, наскільки умови досліду відповідають цілому ряду теоретичних припущень.

Складна природа взаємодії ґрунту з водою не дає можливості теоретично визначити взаємозв'язок "вологість – потенціал – вологопровідність" і найчастіше він представляється у вигляді емпіричних формул та графіків. Запропоновано багато емпіричних апроксимаційних формул для функції вологопровідності, які більш або менш вдало відтворюють цю функцію на окремих інтервалах [3]. Найбільш відомими є формули ван-Генухтена (1980), Муалема (1976), Гарднера, С.В. Авер'янова, В.А. Бодрова, А.І. Будаговського.

Спеціальний аналіз цих формул і області їх використання показав, що для мінеральних і торфових ґрунтів найбільш придатними є формули які отримав ван-Генухтен [4], використавши в інтегралах формул Муалема і Бердайна [5] вирази для водоутримуючої здатності ґрунтів та вологопровідності:

$$k(W) = k_f \cdot S_e^{1/2} \left[1 - \left(1 - S_e^{1/2} \right) \right]^2, \text{ де } S_e = \frac{W - W_r}{W_s - W_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \cdot \psi)^n} \right]^m \quad (1)$$

$$k(\psi) = \frac{k_f \cdot \left\{ 1 - (\alpha \cdot \psi)^{m \cdot n} \cdot \left[1 + (\alpha \cdot \psi)^n \right]^{-m} \right\}^2}{\left[1 + (\alpha \cdot \psi)^n \right]^{m \cdot l}}, \quad (2)$$

де m, n, α – параметри апроксимації експериментальних даних ОГХ, де $m = 1 - 1/n$, $0 < m < 1$; n, α – два основних параметра апроксимації реальних даних ОГХ, які мають фізичний зміст, n – безрозмірна величина, що характеризує кут нахилу кривої ОГХ, її крутизну ($n = 1 \dots 4$); α – величина, яка обернена значенню тиску входу повітря і тому має розмірність (1/тиск, наприклад 1/м); k_f – коефіцієнт фільтрації (м/добу); ψ – капілярно-сорбційний потенціал (м); W – об'ємна вологість, яка відповідає даному потенціалу (%); W_r – мінімально можлива вологість (%); W_s – повна вологоємність (%).

На даний 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) нейророзрахунків, теорії неймовірності, генетичних алгоритмів [6] і штучних нейронних мереж. Проблема використання нейронних мереж для ідентифікації гідрологічних і водно-фізичних властивостей ґрунтів розглянуті багатьма дослідниками [5, 6, 9-11]. Так наприклад, штучні нейронні мережі були використані Пачепським із співавт. [9] для оцінки основної гідрофізичної характеристики, а також Шаапом [10, 11] для знаходження параметрів рівняння ван-Генухтена.

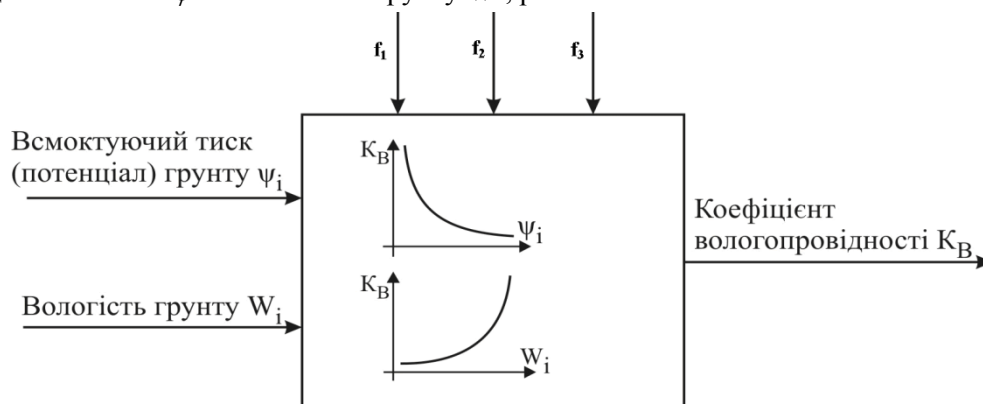
Постановка завдання

У роботі поставлено задачу розробки альтернативної методики розрахунку коефіцієнта вологопровідності ґрунту на базі нейронних мереж, аналізі роботи нейромереж різної архітектури, порівняння їх роботи з результатами визначення коефіцієнта вологопровідності за аналітичними формулами та з експериментальними даними.

Основний зміст

Нейронні мережі (НМ) – це обчислювальні структури, які моделюють прості біологічні процеси, що асоціюються з процесами мозку людини. НМ представляють собою системи, здатні до адаптації та навчання шляхом аналізу позитивних і негативних впливів [8]. Основним джерелом знань про об'єкт моделювання (керований модуль меліоративної системи) є архів даних про зміну вхідних і вихідних параметрів. На базі архіву з врахуванням обраної архітектури нейронної мережі створювався набір тренувальних шаблонів $\{X_i, Y_i\}_j, j=1, J$, кожен з яких включав вектор відомих вхідних сигналів X_{ij} і відповідний йому вихід мережі Y_{ij} . Навчання вибраного варіанта моделі зводиться до налаштування параметрів нейромережі (параметрів передаточних функцій нейронів, вагових коефіцієнтів) так, щоб вона найкраще запам'ятовувала набір тренувальних шаблонів. НМ служить своєрідним індикатором правильності вибору нами вхідних параметрів. При включенні до вхідного вектора параметра, який тісно пов'язаний з модельованим процесом, похибка прогнозування зменшиться. У разі прогнозування вологопровідності ґрунту актуальним є пошук комбінацій вхідних змінних, що роблять вирішальний вплив на формування значення прогнозованої вихідної змінної.

Заформуємо початковий список вхідних даних. З аналізу літератури відомо, що водоутримуюча здатність ґрунтів та вологопровідність в меншій степені залежать від таких факторів як клімат, рослинність, рельєф, а більше від таких, як механічний, агрегатний, мінералогічний склад, щільність [3]. Та найкраще аналіз даних по вологопровідності для різних ґрунтів зручно робити на основі взаємозв'язку k з головними факторами, які визначають його: з потенціалом вологи ψ та вологістю ґрунту W , рис.2.



f_1, f_2 - механічний і агрегатний склад ґрунту; f_3 - структура ґрунту; $k = f(\psi)$ - залежність коефіцієнта вологопровідності від капілярного потенціалу; $k = f(W)$ - залежність коефіцієнта вологопровідності від вологості ґрунту.

Рис. 2. Інформаційна схема об'єкта.

Масив дослідних даних зібраний на репрезентативних ділянках Сарненської дослідної станції (торфові ґрунти) і Рівненської дослідної станції (мінеральні ґрунти). В польових умовах та в лабораторії при вивченні вологопереносу в потокомірі за допомогою тензіометричних вологомірів, термостатно-вагового методу визначались всмоктуюча сила (потенціал), вологість ґрунту і коефіцієнт вологопровідності. Для торфового ґрунту було отримано 129 експериментальних значень k , для мінерального ґрунту – 170.

Для розрахунку k створено нейронну мережу виду:

$$k = NN(W_1, W_2, \psi_1, \psi_2), \quad (3)$$

де входними параметрами є:

W_1 і W_2 - значення вологості на середині двох суміжних шарів ґрунту;

ψ_1 і ψ_2 - значення всмоктуючого тиску ґрунту у цих шарах;

вихідним параметром є k_i - коефіцієнт вологопровідності ґрунту;

NN - перетворення, яке здійснюється нейронною мережею.

Побудова, навчання і тестування нейронних мереж проводилося у нейроемуляторі NeuroPro та редакторі Neural Network Toolbox (редактор для роботи з нейронними мережами) системи MatLab. При цьому використовувались мережі різної архітектури: багатошарова, узагальнено-регресійна мережа (newgrnn), лінійна (newlind), мережа з радіальними базисними елементами з нульовою помилкою на навчальній вибірці даних (newrbe), мережа з радіальними базисними елементами (newrb), "класична" багатошарова нейронна мережа з навчанням за методом зворотного поширення помилки (newff), мережа Елмана (newelm), багатошарова нейронна мережа зі зворотним поширенням помилки - каскадна НМ (newcf), перцептрон (newp), ймовірнісна нейронна мережа (newrnn).

Результати навчання і тестування нейромереж на незалежних вибірках даних представлені в таблиці 1 і таблиці 2.

Таблиця 1.

Результати навчання і тестування нейромереж для шару ґрунту легкоуглинистого механічного складу 2,5-7,5 см на незалежній вибірці даних

Мережа	Кількість входів	Всього точок		Середньоквадратична помилка		Нейроемулятор
		навчання	тестування	навчання	тестування	
1	4	85	85	4,786E-06	6,8E-04	NeuroPro
2				4,468E-05	1,0676E-04	Neural Network Toolbox (MatLab)
3				1,018E-04	4,7783E-04	
4				2,137E-04	8,7885E-04	
5				2,1E-03	9,4803E-04	
6				2,3E-03	9,2803E-04	
7				0,5E-03	1,1E-03	
8				0,3123	0,0436	
9				0,3091	0,1288	
10				0,9995	0,9996	

1 – багатошарова, 2 – мережа з радіальними базисними елементами, 3 – узагальнено-регресійна мережа, 4 – мережа з радіальними базисними елементами з нульовою помилкою на навчальній вибірці даних, 5 – перцептрон, 6 – лінійна мережа, 7 – багатошарова мережа зі зворотним поширенням помилки - каскадна НМ, 8 – мережа Елмана, 9 – "класична" багатошарова мережа з навчанням за методом зворотного поширення помилки, 10 – ймовірнісна мережа

Багатошарова нейромережа, мережа з радіальними базисними елементами, узагальнено-регресійна та мережа з радіальними базисними елементами з нульовою помилкою на навчальній вибірці даних забезпечують високу точність при роботі як з навчальними, так і з тестовими даними, тому вибираємо їх для розрахунку коефіцієнта вологопровідності на дерново-підзолистих ґрунтах.

Таблиця 2.
Результати навчання і тестування нейромереж для шару торфяного ґрунту 12,5-30,0 см на незалежній вибірці даних

Мережа	Кількість входів	Всього точок		Середньоквадратична помилка		Нейроемулятор
		навчання	тестування	навчання	тестування	
1	4	67	62	1,2107E-04	5,32E-03	NeuroPro
2				3,4E-03	5,7E-03	
3				7,1E-03	7,5E-03	
4				2,690E-05	1,12E-02	
5				0,0126	0,0143	
6				0,1452	0,0670	
7				0,0579	0,0723	
8				0,0644	0,0735	
9				0,0644	0,0749	
10				0,9612	0,9474	

1 – багатошарова, 2 – узагальнено-регресійна мережа, лінійна мережа, 3 – мережа з радіальними базисними елементами з нульовою помилкою на навчальній вибірці даних, 4 – мережа з радіальними базисними елементами, 5 – "класична" багатошарова мережа з навчанням за методом зворотного поширення помилки, 6 – мережа Елмана, 7 – багатошарова мережа зі зворотним поширенням помилки - каскадна НМ, 8 – перцептрон, 9 – ймовірнісна мережа

Багатошарова нейромережа, узагальнено-регресійна, лінійна та мережа з радіальними базисними елементами з нульовою помилкою на навчальній вибірці даних забезпечують високу точність при роботі як з навчальними, так і з тестовими даними, тому вибираємо їх для розрахунку коефіцієнта вологопровідності на торфових ґрунтах.

Розрахунки проводилися для ґрунтів легкосуглинистого механічного складу та торфів, що характерні для зони Полісся України.

Проведена статистична обробка всіх даних, які були введені і отримані. Всі введені і отримані дані були статистично опрацьовані з знаходженням максимумів, мінімумів, середніх і медіанних значень, коефіцієнта кореляції та середньоквадратичного відхилення, результати представлені в таблиці 3.

Таблиця 3.
Статистичні параметри використаних даних

Тип ґрунту	Всього точок	Максимум	Медіана	Мінімум	Середнє	Коефіцієнт кореляції	Середньоквадратичне відхилення
Мінеральний ґрунт	85	4,09E-03	9,44E-05	5,54E-05	2,01E-04	0,8611	0,0006858
Торфовий ґрунт	62	1,50E-01	1,56E-02	8,10E-04	4,01E-02	0,9950	0,005479

Результати визначення коефіцієнта вологопровідності нейромережею, за формулою ван-Генухтена та порівняння їх з експериментальними даними представлені в таблиці 4 та на рис.3.

Таблиця 4.
Результати визначення коефіцієнта волого провідності

Модель	Середньоквадратична помилка (мінеральний ґрунт)		Середньоквадратична помилка (торфовий ґрунт)	
	навчання	тестування	навчання	тестування
Ван-Генухтена	0,005859064	0,00533729	0,02542259	0,02664897
Нейронна модель	0,000897	0,0006858	0,007436	0,005479

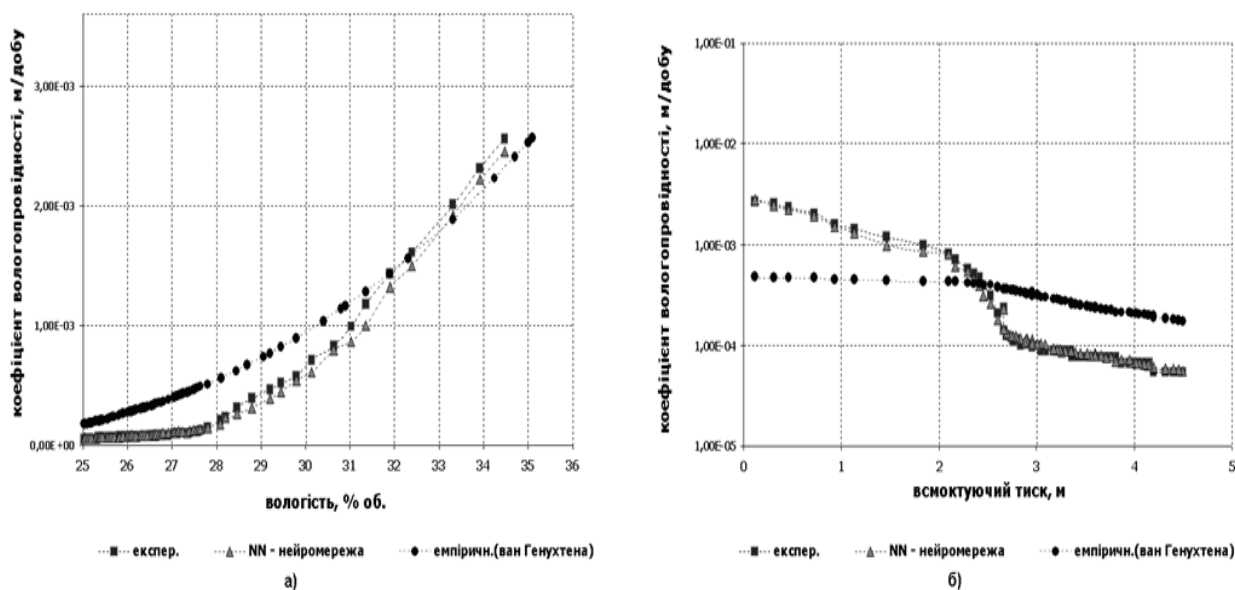


Рис.3. Залежності коефіцієнта вологопровідності від вологості (а) та всмоктуючого тиску ґрунту (б) для мінеральних ґрунтів.

Висновки

Отже, запропонована методика дозволяє із необхідною точністю визначати коефіцієнт вологопровідності ґрунту, використовуючи експериментальну вибірку даних моніторингу вологості та потенціалу ґрунту, і може бути застосована для ідентифікації параметрів математичної моделі вологопереносу в задачах оперативного водорегулювання при підґрунтовому зволоженні.

Список літературних джерел

1. Системна оптимізація водокористування при зрошенні. Ковальчук П.І., Пендак Н.В., Ковальчук В.П., Волошин М.М. — Рівне: НУВГП, 2008. — 204 с. ISBN 978-966-327-097-5.
2. Н.А. Муромцев Мелиоративная гидрофизика почв. Методы исследования, гидрофизические закономерности, регулирование водного режима почв и растений. — «Ленинград гидрометеиздат», 1991, 271 с.
3. Глобус А.М. Почвенно-гидрофизическое обеспечение агроэкологических математических моделей. Л.: Гидрометеиздат, 1987. — 423 с.
4. van Genuchten. M. Th. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil // Soil. Sci. Soc. Am. J. 1980, v.44, N 5, P.892 – 898.
5. Mualem Y. A. New model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media. — WRR, 1976, v.12, N 3, p.513-522.
6. Rahman M. S., Wang J., Deng W., Carter J. P. A Neural Network Model for the Uplift Capacity of Suction Caissons // Computers and Geotechnis. 2001. № 28. P. 269-287.
7. Суат Акбулут. Применение искусственных нейронных сетей для предсказания коэффициента фильтрации в грубозернистых почвах / Суат Акбулут // Почвоведение. — 2005. — № 4. — С. 446 – 452.
8. Каллан Роберт. Основные концепции нейронных сетей.: Пер. с англ. — М.: Издательский дом "Вильямс", 2001. — 286 с.
9. Pachepsky Ya. A., Timlin D., Varallyay G. Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data // Soil. Sci. Soc. Am. J. 1996. v. 60. P. 727-733.
10. Schaap M. G., Bouten W. Modeling water retention curves of sandy soils using neural networks // Water Resour. Res. 1996. V.32. P. 3033-3040.
11. Marcel G. Schaap and Feike J. Leij Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem – van Genuchten model // Soil. Sci. Soc. Am. J. 2000. v.64. P.843-851.