

УДК 631.6
© 2026

АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ДРЕНАЖНИХ СИСТЕМ ДЛЯ УМОВ УКРАЇНИ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ*

*М.І. Ромащенко¹, В.О. Богаєнко²,
С.С. Коломієць³, А.С. Сардак⁴, Г.В. Воронай⁵*

¹доктор технічних наук, академік НААН

²доктор фізико-математичних наук

³кандидат сільськогосподарських наук

⁴доктор філософії

⁵доктор технічних наук

¹Київський аграрний університет

Національної академії аграрних наук України
вул. Васильківська, 37-А, м. Київ, 03022, Україна

^{1, 3-5}Інститут водних проблем і меліорації

Національної академії аграрних наук України
вул. Васильківська, 37, м. Київ, 03022, Україна

¹Національна академія аграрних наук України
вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 9, м. Київ, 01010, Україна

²Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова

Національної академії наук України

пр-т Академіка Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна

e-mail: ¹mi.romashchenko@gmail.com, ²sevab@ukr.net, ³kss2006@ukr.net,

⁴anastasiabilobrova1993@gmail.com, ⁵voropaig@ukr.net

ORCID: ¹0000-0002-9997-1346, ²0000-0002-3317-9022,

³0000-0002-4329-4382, ⁴0000-0002-0540-9492, ⁵0000-0002-5004-0727

Надійшла 20.10.2025. Рецензована 17.12.2025. Прийнята до друку 17.02.2026

Мета. Дослідити умови підвищення ефективності водорегулювання на меліорованих землях в Україні в умовах сучасних кліматичних змін. Об'єктом дослідження є дренажні системи подвійної дії, здатні виконувати функцію як дренажування, так і забезпечення рослин вологою протягом усього вегетаційного періоду. **Методи.** Проведено серію обчислювальних експериментів для різних ґрунтових умов (торфових, суглинкових, супіщаних і піщаних) України з використанням математичної моделі Річардса та процедури визначення допустимих параметрів дренажних систем (глибини закладання і міждренної відстані) за різних режимів, коли критичною функцією є дренажування чи вологозабезпечення. Зокрема, розглядалися як багат шарові моделі досліджуваних ґрунтів, так і їх окремі шари. Також досліджували визначення зміни коефіцієнта вологоперенесення від рівня напору. Для цього використано такі форми залежностей, які є верхніми та нижніми наближеннями лабораторно визначених значень. **Результати.** Моделювання показало, що найбільші міждренні відстані (> 50 м) характерні

*Стаття друкується в порядку обговорення.

для торфових ґрунтів, тоді як для лучних чорноземів суглинкового складу вони не перевищують 6–11 м. Для піщаних і супіщаних ґрунтів відстань змінюється в межах 11–50 м. Згідно з результатами моделювання, у разі евапотранспірації (ЕТ) на рівні 2 мм/добу на початку сезону вегетації забезпечення вологоспоживання можливе для більшості розглянутих ґрунтів, проте за $ET = 10$ мм/добу в період найвищого вологоспоживання — лише для торфових і частини супіщаних ґрунтів. **Висновки.** Отримані результати моделювання свідчать, що оптимальні параметри істотно відрізняються залежно від типу ґрунту й рівня вологоспоживання культур, а в окремих випадках реалізація подвійної функції є обмеженою.

Ключові слова: водорегулювання, дренажні системи, математичне моделювання, оптимізація параметрів, рівняння Річардса.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202602-07>

Проблема підвищення ефективності водорегулювання залишається надзвичайно актуальною для значних площ України, особливо в зоні Полісся, де функціонує близько 3,2 млн га дренажних систем різних типів [1]. Більшість із них були створені у другій половині ХХ ст., коли кліматичні умови відрізнялися від сучасних. Первинним завданням цих систем було відведення надлишкової вологи у весняний період та формування достатнього обсягу зони аерації для акумуляції опадів влітку [2]. Однак за сучасних кліматичних умов, що характеризуються зростанням середніх температур і посиленням літньо-осінніх посух [3], на території Українського Полісся з липня спостерігається брак природного зволоження. Це зумовлює потребу реконструкції та модернізації наявних дренажних систем з урахуванням функції регулювання водного режиму протягом усього вегетаційного періоду.

Реалізація цієї функції може здійснюватися завдяки:

- регулюванню рівня ґрунтових вод;
- проведенню додаткового зрошення;
- інтегрованому підходу, що поєднує обидва варіанти.

У цьому разі ефективність водорегулювання значною мірою визначається наявністю сучасного інструментарію для обґрунтування управлінських

рішень. Такий інструментарій має, з одного боку, враховувати економічну ефективність системи й інші аспекти, пов'язані з наданням нею екосистемних послуг [4], а з іншого — базуватися на моделюванні фізичних і біологічних процесів у системі «ґрунт–рослина–атмосфера» [5]. Для створення надійних прогнозних моделей використовують дані про гідрофізичні властивості ґрунтів (бажано отримані експериментально), а також результати польових вимірювань стану меліоративних систем та динаміки вологості у ґрунтового профілі.

Зауважимо, що в минулому через відсутність ефективних обчислювальних засобів для розв'язання диференціальних рівнянь, зокрема рівняння Річардса, та механізмів (датчиків) для вимірювання (моніторингу) стану ґрунтової вологи, активно застосовувалися підходи, які базуються на спрощених чи емпіричних моделях, побудованих на результатах польових досліджень [6, 7]. Нині математичне моделювання процесів вологоперенесення є не тільки основою для опису процесів вологоперенесення, а й ефективним інструментом проведення досліджень на базі імітаційного моделювання можливих варіантів використання різних конструкцій і режимів експлуатації меліоративних систем. Це дало змогу уникнути головного недоліку

польових досліджень та емпіричних моделей, побудованих на їх основі, а саме — неможливості їх масштабування за межі умов проведення експериментів. Саме тому для широкомасштабного дослідження різних сценаріїв ключовим є математичне моделювання, що базується на описі процесів, коли експериментальні дані за можливості використовують лише для калібрування та верифікації моделей.

Найпоширенішу групу для опису руху вологи в ненасиченому ґрунтовому профілі становлять моделі, похідні від класичного рівняння Річардса [8], яке описує капілярно-гравітаційний рух води в пористому середовищі. Для розв'язання цього рівняння використовують як підходи з аналітичними чи чисельно-аналітичними розв'язками для спрощених умов [9, 10], так і повністю чисельні методи — від класичних методів скінченних різниць чи скінченних елементів до сучасних високоефективних схем [11, 12]. Ефективність цього методичного підходу підтверджено його широким використанням у наукових дослідженнях [13, 14].

Зауважимо, що в системі прийняття рішень щодо управління та проєктування дренажних систем [15] і в конкретних дослідженнях [16, 17] переважно акцентується винятково на ефективності дренажування. Спираючись на раніше розроблені інструменти математичного моделювання [18], головну увагу автори приділяють визначенню та аналізу

значень конструктивних параметрів дренажних систем саме подвійної дії для конкретних ґрунтових умов.

Мета досліджень — оцінити на основі проведення сценарного математичного моделювання можливості виконання дренажними системами подвійної функції — дренажування і забезпечення рослин вологою протягом усього вегетаційного періоду в різних ґрунтових умовах (торфових, суглинкових, супіщаних і піщаних) України.

Матеріали та методи досліджень. *Математична модель.* Розглянемо завдання моделювання динаміки напору в ґрунтовому масиві, на якому водорегулювання здійснюється системою подвійної дії за таких умов [18]:

- дренажні трубопроводи, які встановлено без ухилу, поєднують два канали;
- дрени вважають постійно повністю заповненими водою;
- в обох каналах підтримують однаковий рівень води.

За великої відстані між каналами фільтрацією з них можна знехтувати, а якщо розподіл вологи вздовж дрен вважати однорідним, тоді моделювання можна проводити у 2-вимірному наближенні, розглядаючи розріз, паралельний дренажним каналам, посередині між ними. Зону моделювання в такому разі можна обмежити ділянкою впливу однієї дрени (рис. 1) [18]. У точці розміщення дрени задають напір, що дорівнює рівню води в каналах над дреною.

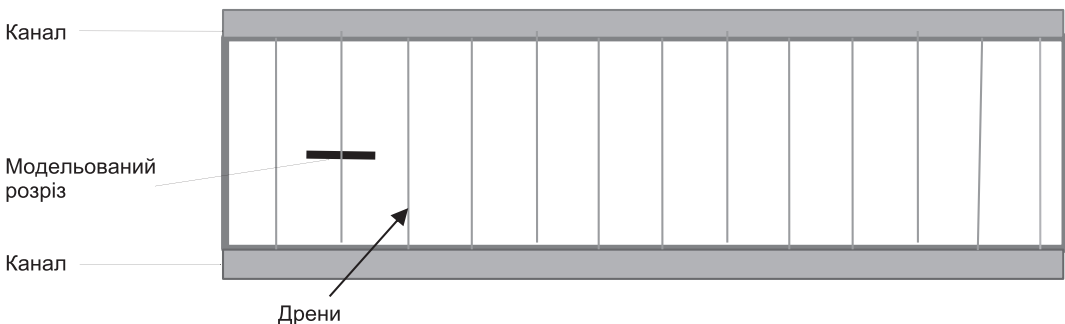


Рис. 1. Зона моделювання [18]

Вважаємо, що напір у дрени фіксований по всій довжині. Нижньою межею зони моделювання є водотрив.

У процесі моделювання використовують рівняння Річардса в термінах напорів [18], що враховує перехід стану ґрунту з ненасиченого в насичений, у формі, описаній у [19]:

$$\left[C(h, z) + \frac{\theta(h, z)}{\theta_s(z)} S_s(z) \right] \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(h, z) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(h, z) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right) - S(x, z, t),$$

де $0 \leq x \leq L$, $0 \leq z \leq L_z$, $t \geq 0$; $h(x, z, t)$ — напір, м; $C(h, z) = \frac{\partial \theta}{\partial h}$, $\theta(x, z, t)$ — об'ємна вологість ґрунту, %; $\theta_s(z)$ — вологість насичення, %; $S_s(z)$ — коефіцієнт пружної ємності, $1/\text{м}$; $k(h, z)$ — коефіцієнт вологоперенесення, $\text{м}/\text{с}$; $S(x, z, t)$ — функція, що моделює екстракцію вологи корінням рослин, $1/\text{с}$.

Ґрунт вважають таким, що має шарувату структуру. Основну гідрофізичну характеристику (ОГХ) ґрунту описано згідно з моделлю Ван Генухтена [20]. Залежність коефіцієнта вологоперенесення від напору представлено згідно з моделями Муалема [21] чи Авер'янова [22], відповідно до того, яка з них краще описує експериментальні дані. Ширина зони моделювання L дорівнює міждренній відстані. Моделюють одну дренажну систему, яку вважають точковою та розміщеною там, де $x = L/2$ [18]. У місці розміщення дрени задають напір, що дорівнює рівню води в каналах над дренажем [12]. Форма функції джерел та крайові умови детально описано в працях [18, 23], а особливості моделювання взаємодії дрени та ґрунтового середовища — у [18]. Чисельне розв'язання початково-крайового завдання виконують згідно з неявною скінченно-різницевою схемою Кранка — Ніколсона на рівномірній різницевій сітці за простором із використанням алгоритму адаптивного підбору кроку за часом [24].

Процедура визначення глибини закладання та відстані між дренами. У випадку, коли критичною функцією системи подвійної дії вважають дренажування і допускають додаткове поверхневе зрошення, процедура визначення оптимальної глибини закладання дрени та відстані між ними — така сама, як у праці [18]. У межах цієї процедури модельована глибина закладання дрени зменшується із заданим кроком, починаючи з глибини дна каналу, закінчуючи глибиною шару, якому потрібне дренажування на початку сезону. Для кожного значення глибини методом бісекції визначають [18]:

- максимальну міждренну відстань, за якої система виконує функцію дренажування на початку сезону;
- мінімальне за визначеної на попередньому кроці міждренної відстані значення стабільно підтримуваного рівня води, за якого в каналах у стані, наближеному до стаціонарного, мінімальний середньозважений напір у кореневмісній зоні є більшим за рівень передполивного порогу в ситуації низького вологоспоживання. За таких умов потрібно, щоб максимальний середньозважений напір у кореневмісній зоні не перевищував значення, за якого ґрунт потребує дренажування;
- аналогічне мінімальне значення стабільно підтримуваного рівня води в каналах для ситуації високого рівня вологоспоживання та максимально розвиненої кореневої системи рослин.

Якщо на всіх трьох етапах процедури отримано відповідні значення, то глибину розміщення і визначену міждренну відстань вважають допустимими. Оптимальною є глибина, за якої міждренна відстань найбільша. У разі, коли критичною функцією є забезпечення вологоспоживання, процедура моделювання змінюється так: для кожної з глибин спочатку визначають максимальну міждренну відстань, за якої система забезпечує виконання функції дренажування. Далі методом бісекції знаходять

максимальну міждренну відстань, за якої система забезпечує вологоспоживання і на початку сезону вегетації, і за максимального рівня евапотранспірації.

Вихідні дані для моделювання. Використовували такі тестові вихідні дані, що відповідають певній можливій конфігурації дренажної системи:

- Радіус дрени — 0,2 м, довжина — 150 м. Глибина водотриву — 3 м.
- Глибина каналу — 2 м, ширина — 3 м.
- Мінімальний підтримуваний діапазон середніх напорів у кореневмісній зоні — 40 кПа (або напір, менший за 40 кПа, за якого коефіцієнт вологоперенесення дорівнює 10^{-3} м/добу). Дренування завдяки зниженню рівня води в каналах здійснюють за середнього рівня напорів у кореневмісній зоні — понад 5 кПа.

- Евапотранспірація в разі високого рівня вологоспоживання становила 6 чи 10 мм/добу, а за низького рівня — 2 мм/добу. Відстань між рослинами — 66 см, глибина кореневої системи за високого вологоспоживання сягала 50 см, а за низького — 20 см.

- На початку сезону в разі дренування впродовж не більше 5 діб мінімальна глибина вологонасиченої зони має бути доведена до 40 см.

Досліджували такі характерні для зони осушення ґрунти:

- *Органогенні:* (1) — осушуваний торфовий ґрунт на території Панфільської дослідної станції, Київська обл.; (2), (3) — два торфових ґрунти на землях Сарненської дослідної станції, Рівненська обл.;

- *Мінеральні ґрунти:* (4), (5), (6), (7) — лучно-чорноземні ґрунти в с. Небелиця Київської обл. ((4), (7) — суглинок легкий, (5) — суглинок середній, (6) — пісок); (8) — супіщаний ґрунт на землях осушувальних систем (ОС) «Мельницька» та «Бобровка» Ковельського р-ну Волинської обл.; (9) — піщаний ґрунт на землях ОС «Мельницька» та «Бобровка» Ковельського р-ну Волинської

обл.; (10) — піщаний ґрунт у с. Маковище Київської обл.

Коефіцієнти моделей Ван Генухтена, Авер'янова та Муалема були одержані за мінімізації середньоквадратичних відхилень від експериментальних даних стосовно кривої висушування. Одержані значення наведено в табл. 1. Як приклад демонстрації залежності вологості та коефіцієнта вологоперенесення від напорів на рисунку наведено графік для торфових ґрунтів. З метою мінімізації впливу на результати моделювання специфічної структури окремих ґрунтів та виявлення властивостей конкретного типу ґрунту моделювання за максимального вологоспоживання на рівні 6 мм/добу було проведено з використанням одношарових моделей досліджуваних ґрунтів.

Використовували дані щодо найглибшого шару ґрунту з властивостями, відмінними від приповерхневого шару (табл. 2).

Досліджували визначення параметрів дренажних систем подвійної дії залежно від зміни коефіцієнта вологоперенесення від напорів з урахуванням потенціальної некоректності лабораторного визначення коефіцієнта вологоперенесення і похибки його опису моделями Авер'янова та Муалема. Для цього під час моделювання використано такі форми цієї залежності, які є верхніми й нижніми наближеннями лабораторно визначених значень (табл. 2).

Результати досліджень. Результати, отримані в разі застосування процедури визначення допустимих конструктивних параметрів системи за критичної функції дренування, наведено в табл. 3 та 4 (лише для тих ґрунтів, для яких, згідно з моделлю, забезпечено виконання відповідної функції).

За результатами моделювання можна дійти таких висновків:

1. Максимальна міждренна відстань, за якої забезпечено швидке дренування

1. Коefіцієнти моделей Ван Генухтена, Авер'янова та Муалема для досліджуваних ґрунтів у шарах (z_0, z_1)

Місце відбору, гранулометричний клас ґрунту	z_0 , м	z_1 , м	θ_r	θ_s	α	n	S_s , 1/м	β	k_r , см/доба	k , см/добу, P = 40 кПа
1. Панфили, торф, модель Муалема	0,05	0,2	0,45	0,74	2,31	0,040	0,01007	2,65	31,99	0,427
	0,2	0,4	-0,91	0,86	1,26	0,003	0,00202	-5,31	6,81	0,051
	0,4	0,6	-3,63	0,95	1,40	0,001	0,00290	-4,00	4,69	0,250
	0,6	0,8	0,08	0,94	1,89	0,005	0,00042	-8,00	6,12	7,48E-05
2. Сарни, торф, модель Муалема	0,15	0,3	0,39	0,76	2,25	0,021	0,00612	1,81	49,15	0,122
	0,35	0,5	-0,79	0,96	1,17	0,006	0,00921	-3,61	81,76	0,076
	0,65	0,8	-3,15	0,96	1,08	0,005	0,01283	-14,41	195,62	0,035
3. Сарни, торф, модель Муалема	0,15	0,3	0,44	0,81	1,85	0,022	0,00675	1,15	62,315	0,034
	0,35	0,5	-0,88	0,97	1,17	0,006	0,00871	-2,31	73,764	0,093
	0,65	0,8	-3,54	0,97	1,07	0,006	0,01367	4,59	295,046	0,159
4. Небелиця, суглинок легкий, модель Авер'янова	0,05	0,2	-0,50	0,45	1,06	0,212	0,09251	20,11	2,54	0,015
	0,25	0,4	-0,14	0,44	1,07	0,200	0,05671	14,68	3,99	0,047
	0,65	0,8	-0,42	0,40	1,06	0,193	0,07272	16,69	6,56	0,085
5. Небелиця, суглинок середній, модель Авер'янова	0,05	0,2	0,25	0,51	1,35	0,053	0,01325	3,81	2,54	0,0433
	0,25	0,4	-0,41	0,41	1,05	0,030	0,00980	67,65	7,03	0,0011
	0,55	0,7	-0,82	0,39	1,03	0,012	0,00410	157,59	1,28	4,56E-09
6. Небелиця, пісок, модель Авер'янова	0,05	0,2	0,07	0,34	3,46	0,013	0,00008	0,49	1,61	0,210
	0,3	0,45	0,02	0,34	2,08	0,018	0,00337	3,05	31,42	0,041
	0,55	0,7	-0,03	0,34	1,51	0,048	0,03238	3,48	26,30	0,134
7. Небелиця, суглинок легкий, модель Авер'янова	0,05	0,2	-0,05	0,37	1,51	0,004	0,00116	8,19	3,44	0,174
	0,45	0,6	0,11	0,36	1,41	0,015	0,00532	3,75	0,94	0,054
	0,65	0,8	-0,21	0,39	1,13	0,025	0,01356	5,50	1,31	0,227
8. Мельницька, супісок, модель Муалема	0	0,15	0,15	0,45	2,44	0,014	0,00109	2,67	5,18	0,30
	0,3	0,45	-0,29	0,34	1,27	0,023	0,01882	3,73	87,03	0,12
9. Мельницька, пісок, модель Муалема	0,05	0,2	0,07	0,40	2,33	0,020	0,00051	2,55	7,34	0,17
	0,3	0,45	0,03	0,36	1,90	0,019	0,00434	3,10	15,94	0,45
10. Маковище, пісок, модель Муалема	0,1	0,2	0,14	0,36	2,97	0,011	0,00013	2,44	2,05	0,17
	0,3	0,4	0,06	0,34	2,15	0,009	0,00021	3,18	1,29	0,16

поверхнього шару ґрунту на початку сезону вегетації, очікувано зменшується зі зменшенням глибини закладання дрен. Найбільші відстані були промодельовані для торфових ґрунтів

(понад 50 м за глибини закладання 2 м). Найменші — для лучних чорноземів (6–8 м за глибини закладання 2 м). Для пісків та супісків відстані були в діапазоні значень від 11 до понад 50 м.

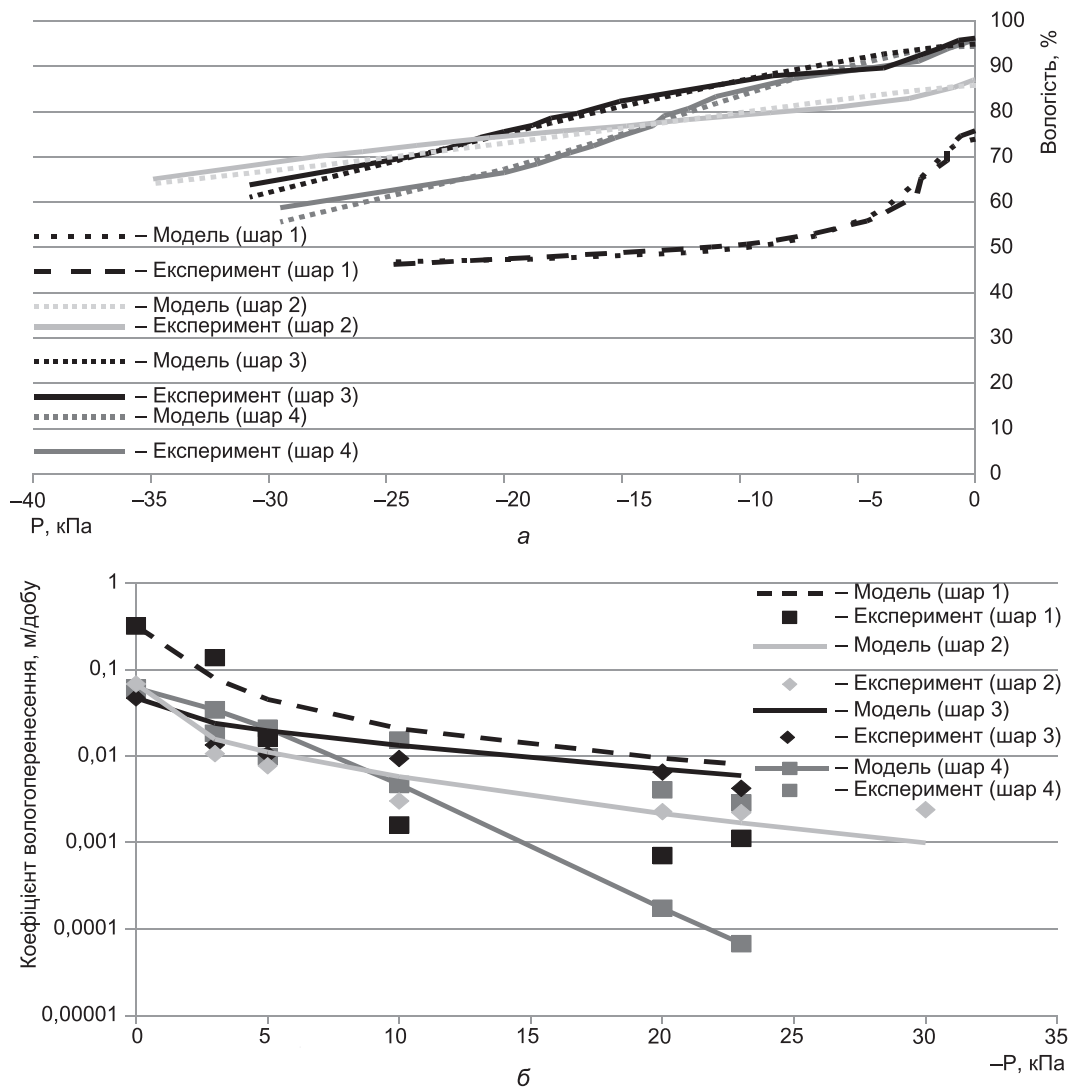


Рис. 2. Залежність вологості та коефіцієнта вологоперенесення від напорів для ґрунту (1) – Панфільська дослідна станція, торф: а) вологість; б) коефіцієнт вологоперенесення

2. У разі розміщення дрен на визначеній максимальній міждренній відстані на торфових ґрунтах вологоспоживання в початковий період вегетації за $ET = 2$ мм/добу забезпечено для всіх глибин розміщення дрен, якщо $РГВ \sim 0,5$ м. На піщаних і супіщаних ґрунтах у деяких випадках, згідно з моделлю, вологоспоживання не можна забезпечити навіть у початковий період вегетації чи можна

забезпечити лише в разі закладання дрен не глибше, ніж на 1,5 м, за утримуваного $РГВ < 0,3$ м. В інших випадках його забезпечують як для торфових ґрунтів за $РГВ \sim 0,5$ м. Для лучних чорноземів вологоспоживання в початковий період вегетації забезпечується в разі закладання дрен глибше, ніж на 1 м, за $РГВ = 0,2-0,5$ м.

3. Для більшості досліджуваних ґрунтів моделювання показує, що в період

2. Коефіцієнти моделей Авер'янова та Муалема для верхнього й нижнього наближення залежності коефіцієнта вологоперенесення від напорів (одношарова модель)

Місце відбору, гранулометричний клас ґрунту	Шар	k_f , см/добу (нижнє наближення)	β (нижнє наближення)	k_f , см/добу (верхнє наближення)	β (верхнє наближення)
1. Панфили, торф	2	6,8	25	6,8	-4
2. Сарни, торф	2	30	-3	110	5
3. Сарни, торф	2	25	-6	110	5
4. Небелиця, суглинок легкий	3	6,56	21	6,56	6
5. Небелиця, суглинок середній	2	25	4,55	26,3	3,48
6. Небелиця, пісок	3	25	4,55	26,3	3,48
7. Небелиця, суглинок легкий	2	0,7	4,25	1,1	2,5
8. Мельницька, супісок	1	5	-1,6	5,5	-3,1
9. Мельницька, пісок	1	7	-1,8	10	-2,54606
10. Маковище, пісок	1	2	-1,6	2	-3,5

3. Максимальна міждренна відстань і рівень води, за якого забезпечено водопотребу рослин у початковий період вегетації (критична функція — дренавання)

Глибина закладання, м	2	1,5	1	0,75	0,5
Місце відбору, гранулометричний клас ґрунту	Максимальна міждренна відстань, м				
1. Панфили, торф	49	46	38	33	12
2. Сарни, торф	49	49	49	49	26
3. Сарни, торф	49	49	49	49	27
4. Небелиця, суглинок легкий	6	5	-	-	-
5. Небелиця, суглинок середній	8	6	5	-	-
6. Небелиця, пісок	24	22	18	16	6
7. Небелиця, суглинок легкий	11	11	9	8	-
8. Мельницька, супісок	48	44	38	33	15
9. Мельницька, пісок	37	35	31	28	18
10. Маковище, пісок	49	49	49	49	49
	Рівень води, за якого забезпечено водопотребу рослин у початковий період вегетації (2 мм/добу), м				
1. Панфили, торф	1,437	1,343	1,437	1,531	1,5
2. Сарни, торф	1,562	1,531	1,562	1,532	1,5
3. Сарни, торф	1,437	1,531	1,437	1,531	1,5
4. Небелиця, суглинок легкий	1,312	1,521	-	-	-
5. Небелиця, суглинок середній	1,812	1,718	1,812	-	-
6. Небелиця, пісок	1,437	1,531	1,437	1,531	1,5
8. Мельницька, супісок	1,437	1,531	1,437	1,531	1,5
9. Мельницька, пісок	-	1,906	-	1,906	1,687

4. Рівень води, за якого забезпечено максимальну водопотребу рослин (критична функція – дренавання)

Глибина закладання, м	2	1,5	1	0,75	0,5
Місце відбору, гранулометричний клас ґрунту	Рівень води, за якого забезпечено максимальну водопотребу рослин (10 мм/добу), м				
2. Сарни, торф	–	–	–	–	1,562
3. Сарни, торф	–	–	1,562	1,531	1,562
8. Мельницька, супісок	–	–	–	–	1,562
Місце відбору, гранулометричний клас ґрунту	Рівень води, за якого забезпечено максимальну водопотребу рослин (6 мм/добу), м				
1. Панфили, торф	1,678	1,531	1,562	1,531	–
2. Сарни, торф	1,562	1,531	–	–	–
3. Сарни, торф	1,562	1,531	1,531	1,531	1,531
6. Небелиця, пісок	1,678	1,531	1,562	1,531	–
8. Мельницька, супісок	–	1,781	1,678	1,718	–

5. Допустимі значення конструктивних параметрів для ґрунту (9) (критична функція – забезпечення вологоспоживання)

Глибина закладання, м	Максимальна міждренна відстань, м	Рівень води, за якого забезпечено водопотребу рослин у початковий період вегетації (2 мм/добу), м	Рівень води, за якого забезпечено максимальну водопотребу рослин (6 мм/добу), м
2	16	1,562	1,937
1,5	18	1,531	1,906
1	14	1,562	1,812
0,75	12	1,531	1,718
0,5	–	–	–

найвищої евапотранспірації на рівні 10 мм/добу вологоспоживання не може бути забезпечене системою подвійної дії без перезволоження зон ґрунтового масиву навколо дрен. Виняток становлять 2 торфових та 1 супіщаний ґрунт, де за РГВ ~ 0,5 м вологоспоживання на рівні 10 мм/добу забезпечують закладанням дрен на глибинах 0,5–1,0 м.

4. У разі нижчого максимального вологоспоживання — на рівні 6 мм/добу — під час моделювання воно забезпечувалося для торфових ґрунтів за РГВ ~ 0,5 м і глибин закладання дрен понад 1,5 м, а іноді й за глибини 0,75 м. У разі менш глибокого закладання дрен

вологоспоживання на рівні 6 мм/добу супроводжувалося перезволоженням. Також такий рівень вологоспоживання забезпечувала система подвійної дії за РГВ = 0,3–0,5 м для супіщаного та піщаного ґрунту в разі глибини закладання дрен понад 0,75 м.

5. Для лучних чорноземів моделювання показує, що неможливо забезпечити вологоспоживання в період його найвищих значень навіть на рівні 6 мм/добу за всіх модельованих конфігурацій системи подвійної дії.

Додатковий обчислювальний експеримент було проведено для порівняння результатів моделювання з параметрами фактично спорудженої дренажної

6. Допустимі значення конструктивних параметрів дренажних систем подвійної дії (одношарова модель)

	Нижнє наближення коефіцієнта вологоперенесення					Верхнє наближення коефіцієнта вологоперенесення				
	2	1,5	1	0,75	0,5	2	1,5	1	0,75	0,5
Глибина закладання, м	2	1,5	1	0,75	0,5	2	1,5	1	0,75	0,5
Місце відбору, гранулометричний клас ґрунту	Максимальна міждренна відстань, м									
1. Панфили, торф	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49
2. Сарни, торф	42	39	34	30	17	49	49	49	49	39
3. Сарни, торф	40	37	32	28	16	49	49	49	49	42
5. Небелиця, суглинок середній	11	10	11	14	7	20	18	15	13	6
6. Небелиця, пісок	16	14	11	9	–	17	15	11	9	–
7. Небелиця, суглинок легкий	12	11	9	8	–	14	13	11	10	6
8. Мельницька, супісок	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49
9. Мельницька, пісок	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49
10. Маковище, пісок	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49
Місце відбору, гранулометричний клас ґрунту	Рівень води, за якого забезпечено водопотребу рослин у початковий період вегетації, м									
2. Сарни, торф	1,812	1,718	1,687	1,718	1,562	1,562	1,531	1,562	1,718	1,562
3. Сарни, торф	1,812	1,812	1,687	1,718	1,562	1,562	1,531	1,562	1,562	1,562
5. Небелиця, суглинок середній	1,812	1,718	1,812	1,906	1,687	1,937	1,906	1,812	1,718	1,562
6. Небелиця, пісок	1,312	1,343	1,437	1,531	–	1,312	1,343	1,437	1,531	–
Місце відбору, гранулометричний клас ґрунту	Рівень води, за якого забезпечено максимальну водопотребу рослин (6 мм/добу), м									
6. Небелиця, пісок	1,312	1,343	1,437	1,531	–	1,312	1,343	1,437	1,531	–

системи на торфовому ґрунтовому масиві Сарненської дослідної станції (глибина закладання дренажу — 90–120 см, довжина — 120 м, діаметр дрен — 50 мм, відстань між дренами — 20 м, ширина по дну каналу — 1,5 м, ширина по верху каналу — 3,3 м, глибина каналу — 1,8 м). Для ґрунту (1) модельована відстань між дренами становила 26 м, тоді як для ґрунту (2) — 32 м, що є більшим за значення, використане в процесі спорудження діючої системи. Причиною цього може бути те, що за нинішніх кліматичних умов зменшилася потреба у дренаванні порівняно

з проєктованою системою до настання «гарячої фази» зміни клімату.

Моделювання за процедурою, коли критичною функцією є забезпечення вологоспоживання, було проведено для ґрунтів, на яких, згідно з результатами попереднього моделювання, неможливо забезпечити вологоспоживання на рівні 6 мм/добу в разі максимальної міждренної відстані, за якої система виконує функцію дренажування. Це були лучно-чорноземні ґрунти суглинки (4), (5), (7) та піски (9) і (10). Моделювання не проводили для ґрунтів (4) та (5) через низькі (< 10 м) значення

максимальної міждренної відстані, за якої система виконує функцію дренажування.

Негативні результати — неможливість забезпечувати вологоспоживання на рівні 6 мм/добу за будь-якої міждренної відстані, більшої за мінімальну — отримано в разі лучно-чорноземних суглинків (7) і пісків (10), на яких, згідно з результатами моделювання, система подвійної дії не здатна забезпечити вологоспоживання на рівні 2 мм/добу на початку сезону вегетації. Результати, отримані для піщаного ґрунту (9), наведено в табл. 5. У цьому разі вологоспоживання на рівні 6 мм/добу можна задовольнити за майже 2-кратного зменшення міждренної відстані порівняно з максимальною відстанню, за якої забезпечується виконання функції дренажування.

Результати, отримані в процесі застосування процедури визначення допустимих значень конструктивних параметрів системи (критична функція — дренажування), для одношарової моделі ґрунтів за верхнього та нижнього наближень до експериментальних даних щодо

коефіцієнта вологоперенесення, наведено в табл. 6 (лише для тих ґрунтів, для яких, згідно з моделлю, гарантується виконання відповідної функції).

За результатами моделювання для одношарової моделі ґрунту можна дійти таких висновків:

1. На торфових, піщаних і супіщаних ґрунтах саме приповерхневий шар (потенціально більш щільний) забезпечує утримання вологи. Коли його не розглядають під час моделювання, результати показують, що система подвійної дії гірше виконує функцію забезпечення вологоспоживання. Однак максимальні міждренні відстані, за яких виконується функція дренажування, є ненабагато меншими (за нижньої оцінки швидкості вологоперенесення) або ж такими самими (за її верхньої оцінки).

2. На лучно-чорноземних ґрунтах вилучення з розгляду приповерхневого шару (потенціально менш щільного) призводить до протилежного ефекту порівняно з торфовими ґрунтами — згідно з результатами моделювання максимальні міждренні відстані збільшуються.

Висновки

Для оцінювання оптимальних значень конструктивних параметрів дренажних систем подвійної дії використано методику, що базується на модифікації рівняння вологоперенесення Річардса, параметризованого згідно з моделями Ван Генухтена та Муалема чи Авер'янова. Аналіз експериментальних даних щодо залежності коефіцієнта вологоперенесення від напорів засвідчив, що за різних типів ґрунтів одна з двох розглянутих моделей (Муалема та Авер'янова) може бути значно точнішою. Згідно з результатами моделювання, для торфових ґрунтів отримано найбільші допустимі міждренні відстані (> 50 м), тоді як для лучних чорноземів суглинкового гранулометричного класу цей показник не перевищує 6–11 м. Для піщаних та

супіщаних ґрунтів відстань варіює в межах від 11 до 50 м залежно від глибини розміщення дрен.

Забезпечення водоспоживання рослин у початковий період вегетації ($E_T = 2$ мм/добу) є можливим для більшості досліджених ґрунтів, водночас за високої евапотранспірації (10 мм/добу) виконати цю умову можна лише на окремих торфових і супіщаних ґрунтах. За максимального (6 мм/добу) водоспоживання система подвійної дії може, згідно з результатами моделювання, забезпечувати баланс між дренажуванням та вологоутриманням для торфових і частини піщаних та супіщаних ґрунтів, але для лучних чорноземів суглинкового гранулометричного класу навіть такий режим виявився недосяжним.

Отримані результати свідчать про необхідність диференційованого підходу до проєктування та реконструкції дренажних систем з урахуванням конкретних ґрунтових і кліматичних умов, а також потенціальної неможливості забезпечити подвійну функцію на деяких ґрунтах без застосування зрошення.

Обмеження запропонованого методичного підходу полягають, зокрема, у тому, що розглянута модель не враховує явища фільтраційної анізотропії, прояв якого може бути істотним на деяких торфових ґрунтах. Також в обчислювальних експериментах

використовували крайове завдання, де розглядали одну дрону як водоприймач за дренажування та джерело вологи за підґрунтового зволоження. В такому разі зона моделювання обмежувалася, що не давало змоги враховувати просторову варіабельність ґрунтового покриву в межах одного ґрунтового масиву. Такий підхід був прийнятий тому, що досліджували вплив ґрунтів із різними властивостями на параметри дренажу, а не їх просторову варіабельність. Проте врахування цих чинників автори розглядають як один із напрямів подальшого розвитку представленого дослідження.

**Romashchenko M.¹, Bohaienko V.², Kolo-
miets S.³, Sardak A.⁴, Voropai H.⁵**

^{1, 3-5}Institute of Water Problems and Land Reclamation of NAAS; 37 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine; ²V.M. Hlushkov Institute of Cybernetics of NAS of Ukraine, 40 Hlushkov ave., Kyiv, 03187, Ukraine; e-mail: ¹mi.romashchenko@gmail.com, ²sevab@ukr.net, ³kss2006@ukr.net, ⁴anastasiabilobrova1993@gmail.com, ⁵voropaig@ukr.net; ORCID: ¹0000-0002-9997-1346, ²0000-0002-3317-9022, ³0000-0002-4329-4382, ⁴0000-0002-0540-9492, ⁵0000-0002-5004-0727

Analysis of design parameters of drainage systems for the conditions of Ukraine by mathematical modeling

Goal. To study the conditions for increasing the efficiency of water regulation on reclaimed lands in Ukraine in the conditions of modern climatic changes. The object of the study was double-acting drainage systems that could perform the function of both drainage and provide plants with moisture throughout the growing season. **Methods.** A series of computational experiments was conducted for different soil conditions (peat, loam, sandy loam, and sandy) of Ukraine using Richards mathematical model and the procedure for determining the permissible parameters of drainage systems (depth of laying and inter-drainage distance) under different modes, when the critical function was drainage or water supply. In particular,

they considered both multilayer models of the studied soils and their individual layers. The determination of the change in the moisture transfer coefficient from the head level was also investigated. For this purpose, the following forms of dependencies were used, which were upper and lower approximations of laboratory-defined values. **Results.** Modeling showed that the greatest inter-day distances (> 50 m) were characteristic of peat soils, while for meadow black soils of loamy composition, they did not exceed 6–11 m. For sandy and sandy loam soils, the distance varied within 11–50 m. According to the simulation results, in the case of evapotranspiration (ET) at the level of 2 mm/day at the beginning of the growing season, providing moisture consumption was possible for most of the soils under consideration, however, according to $ET = 10$ mm/day during the period of the highest moisture consumption — only for peat and part of sandy loam soils. **Conclusions.** The obtained results of modeling indicated that the optimal parameters differed significantly depending on the type of soil and the level of moisture consumption of crops, and in some cases, the implementation of the double function was limited.

Key words: water regulation, drainage systems, mathematical modeling, parameter optimization, Richards equation.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovissnyk202602-07>

Бібліографія

1. Romashchenko M., Faybishenko B., Onopriienko D. et al. Prospects for restoration of Ukraine's irrigation system. *Water International*. 2025. 50(1). P. 104–20. doi: 10.1080/02508060.2025.2472718
2. Voropai H., Kharlamov O., Panteleiev V. General aspects of restoration (reconstruction) of drainage systems on agricultural lands (review of publications). *Land Reclamation and Water Management*. 2023. 1. P. 14–25. doi: 10.31073/mivg202301-359
3. Kuzmych L., Furmanets O., Usatyi S. et al. Water supply of the Ukrainian Polesie ecoregion drained areas in modern anthropogenic climate changes. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*. 2022. 69(1). P. 79–96. doi: 10.2478/heem-2022-0006
4. Rokochinskiy A., Jeznach J., Volk P. et al. Reclamation projects development improvement technology considering optimization of drained lands water regulation based on BIM. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences (SREES)*. 2019. 28(3). P. 432–443. doi: 10.22630/PNIKS.2019.28.3.40
5. Šimůnek J., van Genuchten M.T., Šejna M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages since 2016. *Vadose Zone Journal*. 2016. 6(15):1–25. doi: 10.2136/vzj2016.04.0033
6. Алексеевский В.Е., Васюк Н.И., Мостовой М.Н., Скрипник О.В. Мелиорация и использование осушенных земель; под ред. В.Е. Алексеевского. Киев: Урожай, 1988. 184 с.
7. Скрипник О.В., Воропай Г.В., Пожидаева Н.В. Реконструкція меліоративних систем в умовах реформованого сільськогосподарського виробництва. *Вісник аграрної науки*. 2013. Т. 91. № 1. С. 64–67. https://agrovisnyk.com/oldpdf/visnyk_01_2013.pdf
8. Richards L.A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Journal of Applied Physics*. 1931. 1(5). P. 318–333. doi: 10.1063/1.1745010
9. Segawa M., Maruyama T., Takase K. Estimation of Unit Flood Discharge for Various Land Use Types with a Focus on Urbanization. *Open Journal of Modern Hydrology*. 2016. 6(4). P. 195–211. doi: 10.4236/ojmh.2016.64016
10. Parlange J.-Y., Hogarth W.L., Barry D.A. et al. Analytical approximation to the solutions of Richards' equation with applications to infiltration, ponding, and time compression approximation. *Advances in Water Resources*. 1999. 23(2). P. 189–194. doi: 10.1016/S0309-1708(99)00022-6
11. Zlotnik V., Wang T., Nieber J., Šimunek J. Verification of numerical solutions of the Richards equation using a traveling wave solution. *Advances in Water Resources*. 2007. 30(9). P. 1973–1980. doi: 10.1016/j.advwatres.2007.03.008
12. Bomba A., Tkachuk M., Havryliuk V. et al. Mathematical modelling of filtration processes in drainage systems using conformal mapping. *Journal of Water and Land Development*. 2018. 39(X–XII). P. 11–15. doi: 10.2478/jwld-2018-0054
13. Ellafi M., Simmons R., Deeks L. Drainage models: An evaluation of their applicability for the design of drainage systems in arid regions. *Water and Environment Journal*. 2024. 38(1). P. 3–19. doi: 10.1111/wej.12893
14. Neumann A., Dong F., Shimoda Y. et al. A review of the current state of process-based and data-driven modelling: guidelines for Lake Erie managers and watershed modelers. *Environmental Reviews*. 2021. 29(4). P. 443–490. doi: 10.1139/er-2020-0070
15. Abduljaleel Y., Awad A., Al-Ansari N. et al. Assessment of subsurface drainage strategies using DRAINMOD model for sustainable agriculture: A review. *Sustainability*. 2023. 15(2):1355. doi: 10.3390/su15021355
16. Babitska O., Kharlamov O., Savchuk D. et al. Substantiation of optimal parameters of horizontal systematic drainage in modern water management and climatic conditions in the south of Ukraine. *Land Reclamation and Water Management*. 2022. 1. P. 18–28. doi: 10.31073/mivg202201-322
17. Медведєва О.О. Оцінка ефективності роботи дренажних систем у межах Десантненської сільської ради Кілійського району Одещини. *Меліорація і водне господарство*. 2020. № 2. С. 23–30. doi: 10.31073/mivg202002-252

18. Romashchenko M., Bohaienko V. Mathematical modelling of water regulation processes on dual-action drainage systems. *Land Reclamation and Water Management*. 2023. 1. P. 26–34. doi: 10.31073/mivg202301-360
19. Dogan A., Motz L.H. Saturated-unsaturated 3D groundwater model. I: Development. *Journal of Hydrologic Engineering*. 2005. 10(6). P. 492–504. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2005)10:6(492)
20. Van Genuchten M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. 1980. 44(5). P. 892–898. doi: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x
21. Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*. 1976. 12(3). P. 513–522. doi: 10.1029/WR012i003p00513
22. Brutsaert W. A concise parameterization of the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Advances in Water Resources*. 2000. 23(8). P. 811–815. doi: 10.1016/S0309-1708(00)00019-1
23. Romashchenko M.I., Bohaienko V.O., Matiash T.V. et al. Numerical simulation of irrigation scheduling using fractional Richards equation. *Irrigation Science*. 2021. 39(3). P. 385–396. doi: 10.1007/s00271-021-00725-3
24. Bohaienko V., Gladky A. Multithreading performance simulating fractional-order moisture transport on AMD EPYC. *Journal of Numerical and Applied Mathematics*. 2022. 2. P. 174–182. doi: 10.17721/2706-9699.2022.2.20