ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК 556.3: 631.16
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.13

А. Рокочинський[1], д-р техн. наук, проф.,
E-mail: a.m.rokochinskiy@nuwm.edu.ua;
П. Волк[1], канд. техн. наук, доц.,
E-mail: p.p.volk@nuwm.edu.ua;
Л. Токар[1], канд. техн. наук, доц.,
E-mail: l.o.tokar@nuwm.edu.ua;
О. Шевченко[2], д-р геол. наук, ст. наук. співроб.,
E-mail: shevch62@gmail.com;
В. Турченюк[1], д-р техн. наук, проф.,
E-mail: fwg@ukr.net;
Л. Волк[1], канд. техн. наук, доц.,
E-mail: l.r.volk@ukr.net;
[1]Національний університет водного господарства та природокористування,
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33000, Україна;
[1]Український гідрометеорологічний інститут НАН України та ДСНС України,
пр. Науки, 37, м. Київ, 03028, Україна

МОДУЛЬ ДРЕНАЖНОГО СТОКУ ЯК ВИЗНАЧАЛЬНИЙ ПОКАЗНИК ЕФЕКТИВНОЇ ДІЇ ДРЕНАЖУ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.Є. Кошляковим)

Фільтраційні розрахунки дренажу є фундаментальним завданням меліоративної гідрогеології. Вони необхідні як при зрошенні земель (запобігання засолення), так і при осушенні. Найважливішими параметрами закритого дренажу як головного засобу регулювання рівня ґрунтових вод та їхнього стоку до водоприймачів є відстань між дренами та глибина закладення дрен. Ці параметри залежать від комбінації гідрогеологічних, кліматичних і рельєфотвірних чинників. Природна дренованість території характеризується модулем підземного стоку, а штучна – дренажного стоку, величина якого забезпечує відведення зайвої води із ґрунту до необхідної норми осушення за визначений термін часу. Для виділення чинників, які впливають на розрахункові параметри дренажу, розглянуто два методи розрахунку міждренних відстаней: гідромеханічний, що ґрунтується на теоретичних засадах руху води в природних і технічних системах, та емпіричний, що ґрунтується на переважно статистичному опрацюванні даних численних натурних досліджень. Для кожного із методів виділено переваги та недоліки, викликані невизначеностями при схематизації чинників, що визначають параметри дренажу та ефективність його роботи. За результатами дослідження сформовано структурно-логічну схему, яка відображає вплив головних природних умов (кліматичних, гідрогеологічних, рельєфу) проектних показників ефективної дії дренажу (норма осушення, час, швидкість та обсяги водовідведення) на його розрахункові параметри (модуль дренажного стоку, міждренна відстань, віддаль від осі дрени до водотриву, діаметр дрени, характеристики фільтра тощо). Ці три групи чинників і показників є елементами складної багатопараметричної моделі. Для дослідження впливу мінливості основних чинників на відстані між дренами використано загальноприйняту формулу (ДБН В.2.4-1-99) з урахуванням розробок О.Я. Олійника та А.І. Мурашка, яка враховує конструктивні особливості матеріального горизонтального дренажу. Також застосовано методи статистичного моделювання та теорії імовірності, за допомогою яких розроблено математичні моделі для визначення середнього квадратичного відхилення визначального чинника досліджуваної функції. Визначено, що модуль дренажного стоку кореспондується з величинами норми осушення та часу відведення надлишкової вологи і має істотний вплив на відстань між дренами (86...98 %). На основі запропонованого імовірнісного способу оцінювання модуля дренажного стоку розраховано, що відстані між дренами можна збільшити в 1,10...1,23 рази без істотного зменшення ефективності їхньої роботи, що дозволяє скоротити фінансові затрати на облаштування дренажу.

Ключові слова: дренаж, параметри, модуль дренажного стоку, міждренна відстань, неусталений рух, рівень ґрунтових вод, норма осушення, методи розрахунку, чинники, ефективність дії дренажу.

Постановка проблеми та обґрунтування чинників впливу на параметри дренажу. Територія Українського Полісся входить до зони достатнього та надлишкового зволоження. І хоч у зв'язку із глобальним потеплінням ця зона істотно звузилась, кількість опадів у дощові періоди доходить тут до 150 мм (а в Передкарпатті й більше) та є передумовою підтоплення або перезволоження територій. У посушливі періоди, за відсутності засобів двобічного регулювання режиму ґрунтових вод, виникають ділянки переосушених земель і загострюється пожежна загроза. Саме меліоративні системи двобічної дії із закритим матеріальним дренажем дають можливість досягти рівноваги водного балансу та поліпшити природні умови шляхом регулювання водного і повітряного режиму ґрунтів.

Основні площі осушених земель розташовані на Поліссі та в західному регіоні України і становлять 62 % меліоративного фонду. Майже на 70 % площ меліоративні системи мають закритий дренаж. Технічний стан внутрішньогосподарських осушувальних систем через збиткову діяльність більшості сільгоспвиробників призводить до неспроможності виконання ними своєї основної функції – відведення надлишкових вод, а їхнє руйнування створює екологічні та техногенні ризики. Під час паводків збільшуються зони і терміни затоплення сільськогосподарських угідь і населених пунктів. Лише 29,6 % осушуваних земель Полісся мають сприятливий меліоративний режим, 56,6 % – задовільний, 13,8 % – незадовільний, що зумовлює потребу в реконструкції та модернізації меліоративних систем (*Цуман, 2014*). Завдання підвищення ефективності дії дренажу, з урахуванням економічних вимог щодо зменшення витрат на його облаштування, вимагає вдосконалення теоретичних основ його розрахунків.

Гідрогеологічні умови формування дренажного стоку, або природна і штучна дренованість, визначають економічну та екологічну ефективність дренажних систем. Оскільки на території Полісся переважає атмосферний тип водного живлення, то дренажний стік має явно виражений періодичний характер. Його загальна величина залежить, у першу чергу від кліматичних умов даного району – переважно від кількості опадів і випаровування. Крім кліматичних чинників, на величину дренажного

© Рокочинський А., Волк П., Токар Л., Шевченко О., Турченюк В., Волк Л., 2021

стоку впливають й інші природні умови, у тому числі фільтраційні властивості ґрунту та розчленованість рельєфу. При проектуванні та реконструкції осушувально-зволожувальних систем двобічної дії виконують фільтраційні та гідравлічні розрахунки дренажу, а згадані вище природні показники та характеристики (кількість опадів, випаровування, фільтраційні властивості ґрунтів, їхню водовіддачу, глибину залягання ґрунтових вод, ухил місцевості тощо) параметризують (*Chen et al., 2013; Rokochinskiy et al., 2019; Kovalenko et al., 2019*).

Найважливішими параметрами дренажу, що визначаються *фільтраційними* розрахунками, є відстань між дренами та глибина закладання дрен (*Минаев, 1985*). Ці параметри залежать від багатьох факторів, які пов'язані між собою і можуть бути незалежними за імовірнісним змістом.

Параметри дренажу мають бути такими, щоб дренажна система могла підтримувати заданий водний режим на тій території, яку вона обслуговує. Вимоги до цього режиму визначаються нормою осушення, яка являє собою необхідну глибину ґрунтових вод для тієї чи іншої культури і яку потрібно підтримувати на осушуваній площі в окремі фази розвитку рослин. Крім того, для визначення водного режиму дренажної системи має значення допустима тривалість затоплення земель, умови залягання і фільтраційні властивості перезволожених ґрунтів, параметри дрен, які в сукупності безпосередньо чи опосередковано визначають ефективність дії дренажу.

При цьому слід відмітити, що модуль дренажного стоку є одним із трьох основних показників ефективності дії дренажу на перезволожену територію та на режим ґрунтових вод, і другим (а подекуди й першим) за значенням витратним елементом водного балансу дренованих ґрунтів, який безпосередньо або опосередковано входить до розрахункових залежностей міждренних відстаней через норму осушення, коефіцієнт фільтрації та час відведення надлишкового шару води.

Аналіз результатів дослідження дренажного стоку показує, що його тривалість, об'єм, а також модуль на системах з різноманітними відстанями між дренами і глибиною їхнього закладання істотно відрізняються. Спостереження за дренажним стоком на дослідних ділянках, що мають різні міждренні відстані (*B*), підтверджують загальну закономірність, що при зменшенні відстаней між дренами збільшуються модулі дренажного стоку. Величина модулів дренажного стоку на варіанті з *B* = 10 м є значно більшою, ніж за *B* = 20 м. Так, за забезпеченості *P* = 2,0 %, яку Ц.Н. Шкинкис (*Шкинкис, 1981*) рекомендує як розрахункову, модуль дренажного стоку, за відстані між дренами 10 м становив 0,78 л/с·га, а при *B* = 20 м – 0,36 л/с·га. Різниця величин модуля дренажного стоку є ще більшою за забезпеченості менше 2 %. Тобто максимальні значення дренажного стоку найбільше впливають на відстані між дренами.

Крім того, варто зазначити, що відстані між дренами тісно пов'язані з їхньою глибиною, оскільки саме співвідношення між глибиною і частотою дренувальних елементів визначає динаміку рівня ґрунтових вод між дренами та дренованість ґрунту й території загалом (*Минаев, 1985*).

Різна інтенсивність осушення, яка може бути виражена через ступінь штучної дренованості масиву, обумовлюється гідрогеологічною дією дренажу, визначальним показником якої є *модуль дренажного стоку*. За цим показником визначають конструкцію дренажних систем і розраховують параметри їхніх елементів.

Під час проектування дренажної системи, для досягнення оптимального рівня дренованості території, має закладатися такий *рівень надійності роботи системи*, який забезпечується технічними, економічними та екологічними показниками ефективності її роботи.

Таким чином, багатопараметричність і багатофункціональність параметрів дренажу, які визначаються низкою чинників, відображають об'єктивну складність їхнього визначення, що зумовило розробку значної кількості методів і підходів до їхеього обґрунтування.

Мета роботи: на основі аналізу фільтраційних рівнянь з розрахунку дренажу визначити ступінь обумовленості або залежності модуля дренажного стоку від технологічних параметрів дренажу та природних показників (чинників), що їх визначають; виконати імовірнісне оцінювання параметрів, виділити 1–2 показники ефективності дії дренажу для оптимізації розрахункових моделей.

Отже, спочатку проаналізуємо підходи та залежності щодо визначення міждренних відстаней та з'ясуємо вагомість впливу чинників, які безпосередньо чи опосередковано впливають на величину відстані між дренами.

Аналіз методів визначення міждренних відстаней. На різних етапах розвитку меліоративної науки визначилися два основні методи розрахунку параметрів сільськогосподарського дренажу: ***гідромеханічний***, що ґрунтується на теоретичних засадах руху води в природних і технічних системах, та ***емпіричний***, що ґрунтується на переважно статистичному опрацюванні даних численних натурних досліджень. Кожен з них має свої переваги та недоліки.

Теоретичні засади дренування ґрунтів були закладені у працях Дарсі, Дюпюї, І. Буссінеска. Розроблені ними теоретичні основи розрахунку основних параметрів сільськогосподарського дренажу отримали подальший розвиток у роботах О.М. Костякова, С.Ф. Авер'янова, В.В. Шестакова, О.Я. Олійника, М.Г. Пивовара, В.Л. Полякова, О.І. Івицького, А.І. Мурашка, В.Т. Климкова, В.А. Іоната, А.М. Янголя, Ш.А. Брусиловського, О.І. Голованова, В.Я. Шапрана, Л.Ф. Кожушка, М.О. Лазарчука, В.Г. Муранова, Р. Єггельсманна, Д. Кіркхема, Р. Гловера та ін. (*Гадзала та ін…, 2017*).

Найбільшого поширення у вітчизняній практиці проектування дренажу на осушуваних землях набули залежності запропоновані свого часу О.М. Костяковим, С.Ф. Авер'яновим, А.М. Янголем, О.Я. Олійником, В.Л. Поляковим, В.С. Козловим, А.І. Івицьким, В.А. Іонатом, А.І. Мурашком та ін. (*Гадзала та ін, 2017; Мажайский и др., 2017*).

Однією із перших формул для визначення відстаней між дренами за гідромеханічним методом є формула І. Роте (*Rothe, 1863*), яка враховує інтенсивність атмосферних опадів:

$$B = 2H_p\sqrt{\frac{k}{q}}\,, \qquad (1)$$

де H_p – напір води над дреною, м; k – коефіцієнт фільтрації, м/добу; q – приплив води до дрени, виражений через шар води, м/добу.

Формула справедлива для умов роботи дренажу в однорідному ґрунті, *усталеного* руху ґрунтових вод і залягання дрени на водотриві.

Для розрахунку недосконалих дрен широко застосовується формула С.Ф. Авер'янова

$$B = 2H_p\sqrt{\frac{k}{q}(1+\frac{2m_g}{H_p})\alpha}\,, \qquad (2)$$

де $2m_g$ – відстань від дрени до водотриву, м; α – коефіцієнт "висячості".

Велику складність при визначенні віддалей між дренами за наведеними формулами становить розрахунок припливу води до дрен. Достовірність розрахунку обумо-

влюється насамперед точністю визначення атмосферного живлення на початок розрахункового періоду, а також точністю виділення поверхневого і дренажного стоку. Крім того, у природних умовах дуже рідко має місце усталений режим руху потоку ґрунтових вод.

Для *неусталеного* руху ґрунтових вод, однорідного ґрунту та досконалого дренажу при розрахунку відстані між дренами А.Н. Костяков (*Костяков*, *1960*) запропонував таку формулу:

$$B = 2\sqrt{\frac{k \cdot T_p \cdot h_1 \cdot h_1}{\phi \cdot \mu \cdot (h_1 - h_2)}}\,, \qquad (3)$$

де k – коефіцієнт фільтрації, м/добу; T_p – тривалість розрахункового періоду осушення, діб; μ – коефіцієнт гравітаційної водовіддачі; ϕ – коефіцієнт, що виражає форму депресійної кривої; h_1, h_2 – напір води у середній частині між дренами на початок і кінець розрахункового періоду, м.

Для тих самих умов може бути використана формула А.І. Івицького (*Ивицкий и др., 1979*):

$$B = 4 \cdot \sqrt{\frac{4k \cdot T_p \cdot h_0}{\pi \cdot \phi \cdot \mu \cdot \ln \frac{(b-u-h_0)(b-H+h_0)}{(b-u+h_0)(b-H-h_0)}}}\,, \qquad (4)$$

де h_0 – напір води в дрені відносно її дна, м; b – глибина закладання дрени, м; u – глибина рівня ґрунтових вод (РГВ) на початок розрахункового періоду, м; H – проектна глибина залягання РГВ (норма осушення).

В однорідних ґрунтах, за більш глибокого залягання водотриву, для визначення відстані між закритою регулювальною мережею застосовуються формули А.М. Янголя, В.С. Козлова та інших авторів:

- формула А.М. Янголя (*Янголь, 1965*):

$$B = 2\sqrt{\frac{k \cdot T_p \cdot \alpha \cdot h_1 \cdot h_2}{\mu \cdot (H_p - \alpha_1 h_2) + p^{-e}}}\,; \qquad (5)$$

- формула В.С. Козлова (*Козлов, 1940*):

$$B = 2{,}25\sqrt{\frac{k \cdot T_p \cdot h_1 \cdot h_2 \sqrt{\alpha}}{\mu \cdot (h_1 - h_2)}}\,, \qquad (6)$$

де α_1 і μ – коефіцієнти, що враховують форму кривої депресії; α – коефіцієнт, що враховує недосконалість дренажу.

Одним із недоліків наведених формул є відсутність урахування ступеня зволоження території (за винятком формули А.М. Янголя). Для різних кліматичних зон наведені вище формули, за інших рівних умов, дають одну й ту ж саму відстань між дренами, хоч це не підтверджується результатами досліджень і практикою експлуатації дренажних систем.

При двошаровому ґрунті для розрахунку відстані між дренами А.І. Івицький (*Ивицкий, 1988*) пропонує формулу

$$B = 2\sqrt{\frac{\alpha \cdot (H_p - h_0) \cdot b \cdot T_p}{\mu \cdot (h_p \cdot u) + P_0} + 4\Phi^2 - 4\Phi}\,, \qquad (7)$$

де H_p – розрахункова глибина РГВ від поверхні ґрунту, м; P_0 – кількість води, що підлягає відведенню за рахунок випадання опадів, яка виражена через шар стоку, м; Φ – фільтраційний опір, м. Цю формулу рекомендується використовувати і для багатошарового ґрунту шляхом переходу до двошарової схеми.

Для таких самих умов може бути використана формула В.А. Іоната (*Іонат, 1962*)

$$B = 2\sqrt{\frac{H_p}{q}\left\{k_1 \cdot H_p + 2B\frac{k_1 \cdot m}{B + 2\eta_1} + \lambda \cdot k_2\left(\frac{m_g}{B + 2\eta_1} - \frac{m_g}{B + 2\eta_1^{\,1}}\right)\right\}}\,, \qquad (8)$$

де m_g – відстань від дна дрени до водотриву, м; m – потужність однорідного ґрунту, що розташований нижче дрени, м; λ, η_1, $\eta_1^{\,1}$ – параметри, визначені залежно від коефіцієнтів фільтрації й потужності шарів ґрунту.

За ступенем наукового обґрунтування та врахування головних чинників впливу (властивості ґрунтів, елементи і конструкція регулювальної мережі тощо) можна виділити формули таких авторів:

- С.Ф. Авер'янова (*1959*)

$$B = \sqrt{B_0^2 + \left[m_g(Б_2 + 4f_0)\right]^2} - m_g(Б_2 + 4f_0)\,, \qquad (9)$$

$$B_0 = 2H_p\sqrt{\frac{k}{q}\left(1 + \frac{2m_g}{H_p}\right)}; \quad Б_2 = \frac{4}{\pi}\ln\frac{1}{\sin\frac{\pi \cdot d}{2m_g}}\,; \qquad (10)$$

- А.Н. Костякова (*Костяков, 1960*)

$$B = \frac{\pi \cdot k \cdot \Phi \cdot H_p}{q\left(2{,}3\lg\frac{B}{d} - 1 + \pi \cdot f_0\right)}\,; \qquad (11)$$

- А.І. Івицького (*Ивицкий, 1988*)

$$B = 2\sqrt{\frac{2(H_p - h_e)T_p \cdot T}{8(h_p - \Delta H) + P_0 + \frac{8(H_K - H_{OK})T_p \cdot T}{L(L + 8\Phi_к)}} + 4\Phi^2 - 4\Phi}\,; \qquad (12)$$

- А.І. Мурашко (*Мурашко, 1982*)

$$B = 4\left(\sqrt{L_{нд}^2 + \frac{\tau \cdot T}{4\mu}} - L_{нд}\right)\,, \qquad (13)$$

де T – водопровідність пласта, м²/добу; P_0 – інтенсивність живлення, м/добу.

Для більш складних умов можуть бути використані формули О.Я. Олійника (*Олейник, 1981*) та інших авторів (*Олейник и Поляков*, *1987, Поляков*, *2016*), а також методи моделювання гідродинамічних процесів (*Vrugh et al., 2003; Гадзала та ін, 2017; Мажайский и др., 2017).*

У країнах Західної Європи широке застосування отримали формули Хоогхаудта і Ернста (*der Pboeg et al., 1999*), для застосування в одно- і багатошарових ґрунтах:

- формула Хоогхаудта

$$B = \frac{8R_2 \cdot H_p \cdot d}{q} + \frac{4k_1 \cdot H_p^2}{q}\,; \qquad (14)$$

- формула Ернста

$$B = q\frac{D_v}{k_1} + \frac{q \cdot B^2}{8(k_1 \cdot D_1 + k_2 \cdot D_2)} + \frac{q \cdot B}{\pi \cdot k_1}\ln\frac{cD_0}{\pi \cdot r}\,, \qquad (15)$$

де d – еквівалентна товщина водоносного шару нижче осі дрени, м; D_1, D_2 – потужність першого і другого шарів, м; D_v – потужність шару від верха дрени до депресійної кривої, м; D_0 – потужність шару від верха дрени до лінії розділу шарів ґрунту, м.

У Румунії при розрахунку міждренних відстаней використовують залежність (*Halbac-Cotoara-Zamfir, Costescu, 2010*):

$$L^2 = \frac{4K(2d_e + h + \frac{d_{dren}}{2})}{q}, \quad (16)$$

де K – гідравлічна провідність пласта; d_e – еквівалентна відстань від осі дрени до водотриву; d_{dren} – діаметр дрени; q – модуль дренажного стоку.

При цьому слід зазначити, що ***гідромеханічний метод*** визначення відстаней між дренами є найбільш теоретично обґрунтований, але разом із тим має низку недоліків. Так, істотним недоліком гідромеханічних формул є неврахування умов формування дренажного стоку у фазі підняття РГВ, яка є більш напруженою порівняно із фазою спаду. Необхідно також зазначити, що цей метод розрахунку відстаней між дренами не має належного економічного й екологічного обґрунтування.

Перераховані недоліки методу зовсім не означають, що ним не слід користуватися. Як найбільш теоретично обґрунтований цей метод дає змогу здійснювати якісний аналіз чинників гідрогеологічної дії дренажу, гідродинамічних процесів, що відбуваються в ґрунтах. Гідромеханічні формули мають також величезне значення при узагальненні даних польових досліджень дренажу – у цьому плані їхню роль важко переоцінити.

У практиці проектування дренажних систем розповсюджений також ***емпіричний метод***, за яким відстань між дренами встановлюється залежно від одного або декількох чинників, що впливають на інтенсивність осушення (гранулометричний склад, фізико-хімічні властивості ґрунту, інтенсивність атмосферних опадів, водопроникність порід тощо). До його основи покладено припущення, що чим важчі ґрунти та нижчі їхні фільтраційні властивості, тим меншими мають бути відстані між дренами. Найчастіше у вітчизняній практиці проектування дренажу застосовуються емпіричні залежності, запропоновані Ц.Н. Шкинкисом, Х.А. Писарьковим, А. Думбляускасом, В.П. Кубишкіним.

За Ц.Н. Шкинкисом (*Шкинкис, 1981*), розрахункове значення відстані між дренами для конкретного об'єкта визначається за формулою

$$B = B_n \cdot K, \quad (17)$$

де B_n – нормальна відстань між дренами, яка визначається за графіком залежно від механічного складу ґрунту; K – поправочний коефіцієнт, залежить від природних умов об'єкта

$$K = K_u \cdot K_g \cdot K_h \cdot K_v \cdot K_i \cdot K_K, \quad (18)$$

тут K_u – коефіцієнт, який залежить від ступеня водності даного району; K_g – коефіцієнт, який залежить від ступеня оглеєння ґрунту; K_h – коефіцієнт, який залежить від гідрогеологічних умов; K_v – коефіцієнт залежний від рельєфу; K_K – коефіцієнт, який залежить від хімічних властивостей ґрунтів; K_i – коефіцієнт, що залежить від сільськогосподарського використання земель.

Х.А. Писарьков (*Писарьков, 1978*) пропонує визначати міждренну відстань залежно від гігроскопічної вологоємності ґрунту за формулою:

$$B = N\frac{в - H_p}{\sqrt{5P}}, \quad (19)$$

де $в$ – глибина дренажу, м; P – середньодобова інтенсивність опадів, мм; N – коефіцієнт, який залежить від механічного складу ґрунту.

Для гумідної зони України В.П. Кубишкін (*Гадзала та ін, 2017)* розробив методику розрахунку відстані між дренами, яка значною мірою не має перерахованих вище недоліків. Згідно із цією методикою розрахункова відстань між дренами визначається за формулою

$$B_p = B_{on} \cdot K_c \cdot K_{Є} \cdot K_н \cdot K_A \cdot K_u \cdot K_K, \quad (20)$$

де B_{on} – оптимальна відстань між дренами, визначається за таблицею залежно від генетичного типу ґрунту, коефіцієнтів фільтрації й ухилу поверхні землі; $K_c, K_{Є}, K_н, K_A, K_u, K_K$ – поправочні коефіцієнти, які враховують відповідно висоту шару нахилу його підошвою, експозицію ухилу, напір ґрунтових вод, глибину закладання дрен, ступінь зволоження території, характер господарського використання території.

У наш час, в умовах Латвії, А. Думбляускас рекомендує B визначати за залежністю

$$B = \sqrt[3]{\frac{Г \cdot b_h}{q_0}}, \quad (21)$$

де $Г$ – коефіцієнт, залежить від фізико-механічних властивостей ґрунту; q_0 – модуль дренажного стоку, л/с 1га; b_h – параметр, визначається залежно від глибини закладання дрени і напору води між дренами.

Недоліками наведеної залежності є неврахування ступеня оглеєння, виду водного живлення, глибини залягання водотриву.

У країнах Західної Європи широке застосування також отримали формули для визначення відстаней між дренами з використанням емпіричного методу. Для проектування дренажу на Закарпатті та Прикарпатті із 1898 р. користувалися шкалою А. Корнелла. За цією шкалою відстань між дренами визначається залежно від відсоткового вмісту фракції ґрунту розміром менше 0,05 мм. У Польщі B визначають також залежно від показника гранулометричного складу ґрунту (*Гадзала та ін, 2017; Мажайский и др., 2017*):

$$M = M_1 + \frac{1}{3}M_2, \quad (22)$$

де M_1 і M_2 – вміст у ґрунті часток розміром менше 0,01 мм і 0,01…0,05 мм, %. У цьому випадку відстані між дренами будуть меншими, ніж розраховані за шкалою А. Корнелла (для глинистих ґрунтів 8…15 м, для супіщаних – 18…22 м).

У Німеччині, Франції та Австралії відстань між дренами з урахуванням глибини їхнього закладання визначають за графіком залежно від вмісту в ґрунті фракції розміром менше 0,02 мм.

Мітчерліх пропонує співвідношення *B*/*в* визначати залежно від гігроскопічної вологоємності ґрунту:

$$\frac{B}{в} = 23,6 - 14l_g\theta, \quad (23)$$

де $в$ – глибина дренажу, м; θ – гігроскопічна вологоємність ґрунту.

Значною перевагою емпіричного методу розрахунку міждренних відстаней є його простота і широке застосування, але він також має недоліки. Як показує практика, він потребує значних затрат на реалізацію і водночас має дуже обмежені рамки застосування, які визначені зональними умовами розташування досліджуваного об'єкта.

Викладення основного матеріалу. Як бачимо, у зв'язку з наявністю великої кількості різнорідних чинників і процесів на дренованих територіях різні автори приділяють увагу та віддають пріоритет дещо відмінним показникам та чинникам впливу на параметри дренажу, що призвело до створення численних залежностей. При цьому умови формування дренажного стоку мають невизначений характер у часі. Економічна та екологічна ефективність роботи дренажної системи визначається її технічними характеристиками, тобто конструктивними параметрами дренажу, розрахунки яких базуються на чинниках гідрогеологічної дії дренажу. Тому, щоб вибрати оптимальну для певних умов модель міждренної відстані, потрібно розташувати чинники за рейтингом впливу, позбувшись найменш впливових з них. Для цього можуть бути використані статистичні методи.

На рис. 1 наведена структурно-логічна схема, яка відображає вплив природних умов, представлених як параметризовані предиктори (шар опадів, коефіцієнт фільтрації ґрунтів тощо), на параметри дренажу (відстані між дренами, глибини та ухили закладання, відстані від осі дрен до водотриву, діаметри дрен і характеристики їхньої фільтрувальної частини), які у свою чергу визначають та обернено залежать від модуля дренажного стоку, норми осушення та часу, протягом якого відводиться шар води з ґрунту, і є елементами складної багатопараметричної моделі.

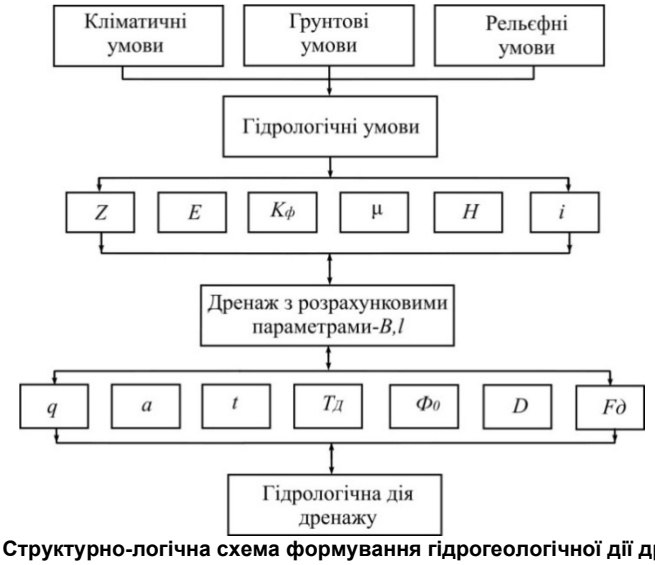

Рис. 1. Структурно-логічна схема формування гідрогеологічної дії дренажу:
$k_Ф$ – коефіцієнт фільтрації; Z – шар опадів; E – шар випаровування; μ – коефіцієнт водовіддачі; H – глибина залягання РГВ; i – ухил поверхні землі; Φ_0 – фільтраційні опори за характером розкриття водоносного пласту; q – модуль дренажного стоку; a – норма осушення; t – час, протягом якого відводиться шар води з ґрунту; $T_Д$ – віддаль від осі дрени до водотриву; D – діаметр дрени; F_∂ – характеристика фільтра дренажу

Таким чином, гідрогеологічна дія дренажу є визначальним чинником ефективності роботи дренажної системи і безпосередньо залежить від розрахункових параметрів дренажу, а саме, – відстані між дренами. У свою чергу, міждренна відстань, згідно з виконаним аналізом її розрахункових залежностей є багатопараметричною функцією (див. рис. 1), в якій доцільно виявити параметри, що мають найбільший вплив на кінцевий результат її формування.

Тому, безумовно, нагальним практичним завданням є дослідження впливу варіабельності головних чинників на відстань між дренами. Для вирішення сформульованого завдання доцільно застосувати методи статистичного моделювання та методи теорії імовірності (*Вентцель, 1969*). Нині проектування об'єктів гідромеліоративних систем базується на детерміністичних залежностях. При цьому визначальний параметр Y, який характеризує працездатність системи, часто є функцією кількох аргументів x_i, тобто маємо функцію (*Науменко, 1994; Науменко та Токар, 2001*):

$$Y = F(x_1, x_2, ..., x_n) . \quad (24)$$

Нерідко природа аргументів $x_1, x_2, ..., x_n$ така, що вони є не детерміністичними, а випадковими величинами. У цьому разі значення функції також набувають випадкових величин, які мають відповідну імовірність. Таким чином, отримання визначального параметра Y з певною імовірністю дає відповідну гарантію не перевищення, тоді як детерміністичні параметри та методи їхніх розрахунків такої гарантії не дають.

Якщо детерміністичні залежності побудовано на базі достатньої кількості дослідних даних, то значення функції за відповідних значень аргументів буде дорівнювати математичному сподіванню:

$$m_Y = F\left(m_{x_1}, m_{x_2}, ..., m_{x_n}\right) . \quad (25)$$

Такі аналітичні детерміністичні залежності можуть бути використані для оцінювання середніх квадратичних відхилень функції.

У переважній більшості випадків функція (24) нелінійна. Проте у вузькому діапазоні зміни своїх аргументів нелінійні функції можна наближено замінити лінійними. Для цього використовують метод лінеаризації функції (*Вентцель, 1969*).

Якщо величини $x_1, x_2, ..., x_n$ не корельовані, то дисперсія і середнє квадратичне відхилення функції дорівнюють

$$D_Y = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial F}{\partial x_i}\right)_m^2 D_{x_i} , \quad (26)$$

$$\sigma_Y^2 = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial F}{\partial x_i}\right)_m \sigma_{x_i}^2 . \quad (27)$$

Частинні похідні у залежностях (26), (27) з індексом m означають, що їхні значення обчислюють при $x_i = m_i$. Вирази для визначення частинних похідних отримують

диференціюванням аналітичної детерміністичної залежності для функції (25).

Для оцінювання достовірності (надійності) значень функції потрібно мати не лише її числові характеристики (математичне сподівання, дисперсію, середнє квадратичне відхилення), але й закон розподілу функції.

У багатьох випадках на значення аргументів впливає значна кількість факторів, унаслідок чого розподіл аргументів близький до нормального. Тому і функція має нормальний розподіл з параметрами m_Y, σ_Y, які визначаються за формулами (25)– 27) (*Науменко, 1994; Вентцель, 1969*).

У такому разі для визначення функції із заданою імовірністю можна використати поняття квантиля або довірчі інтервали (*Вентцель, 1969*)

$$P(Y - Y_p) = P_U, \tag{28}$$

$$I_{Y,\beta} = (m_Y - t_\beta \sigma_Y; m_Y + t_\beta \sigma_Y), \tag{29}$$

де Y_p – таке значення випадкової величини Y, для якої умова $Y < Y_p$ виконується з імовірністю $P_U, t_\beta = f(\beta)$; β – імовірність довіри, з якою випадкова величина Y накривається інтервалом (29).

Для нормального розподілу функції Y одержано

$$P\left(\frac{Y - m_Y}{\sigma_Y} \le U_P\right) = P_U, \tag{30}$$

де U_p – квантиль імовірності P_U, який дорівнює кількості середніх квадратичних відхилень σ_Y випадкової величини Y, які потрібно відкласти праворуч від її середнього значення $\bar{y} = m_Y$.

У практичних розрахунках для визначення оцінок σ_{x_i} можна використати дослідні дані, відповідні аналітичні залежності або поле нормативних допусків (*Вентцель, 1969*). Наприклад, якщо

$$x = \bar{x} \pm \Delta x, \tag{31}$$

то згідно з правилом "трьох сигм" наближено можна отримати

$$\sigma_x = \frac{1}{3}\Delta x. \tag{32}$$

Тоді, використовуючи допустимий або бажаний рівень надійності споруди, можна визначити величину визначального (головного) її параметра (*Науменко, 1994)*. Наприклад, для рівнів надійності $P = P_U = 0,90$ і $P = P_U = 0,99$ відповідно маємо $U_p = 1,282$ і $U_p = 2,326$. Далі отримуємо

$$\left.\begin{aligned} Y_{0,90} &= m_Y + U_P \sigma_Y = m_Y + 1,282\sigma_Y \\ Y_{0,99} &= m_Y + U_P \sigma_Y = m_Y + 2,326\sigma_Y \end{aligned}\right\}. \tag{33}$$

Імовірність того, що споруда з визначальним параметром не виконує своїх функцій дорівнює

$$R_Y = 1 - P_U = \frac{1-\beta}{2}, \tag{34}$$

де β – імовірність довіри, з якою визначальний параметр Y накривається інтервалом (29).

Для виявлення домінантних чинників впливу на параметри, що описують відстань між дренами, доцільно використати загальноприйняту формулу з урахуванням розробок О.Я. Олійника та А.І. Мурашка згідно з ДБ В.2.4-1-99 (*ДБН…, 1999*), яка достатньо повно враховує конструктивні особливості матеріального горизонтального дренажу. Ефективність її застосування підтверджена іншими дослідниками та практикою, як у зоні осушувальних, так і зрошувальних меліорацій.

Для аналізу величини відстаней між дренами в однорідному ґрунті при атмосферному та ґрунтовому водному живленні використано залежність для випадку, коли відстань від осі дрени до водотриву $T_Д \le B/4$, де *B* – відстань між дренами, яка визначається за формулою

$$B = 4\left(\sqrt{\Phi^2 + \frac{HT}{2q}} - \Phi\right), \tag{35}$$

де Φ – загальні фільтраційні опори

$$\Phi = \frac{T_Д}{\pi}\ln\left(\frac{2T_Д}{\pi D}\right) + \frac{2h_0}{\pi}\ln\frac{4h_0}{\pi D} + \frac{T_Д \Phi_0}{\pi} + \frac{2h_0}{\pi}\Phi_0, \tag{36}$$

де D – зовнішній діаметр дрени, м; Φ_0 – фільтраційні опори за характером розкриття водоносного пласту; H – розрахунковий напір, м; T – водопровідність пласта, м²/добу; q – інтенсивність інфільтраційного живлення, м/добу.

Схема для розрахунку відстаней між дренами зображена на рис. 2. На початку розрахункового періоду РГВ збігається з поверхнею ґрунту.

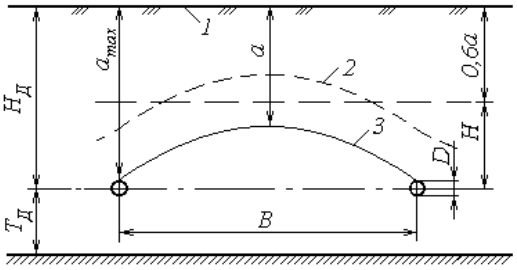

Рис. 2. Схема для розрахунку відстаней між дренами:
1; 2; 3 – рівні ґрунтових вод

Параметри H, T, q та h_0, що входять у формули (35), (36), для режиму осушення визначаються за залежностями:

$$H = H_Д - 0,6a, \tag{37}$$

$$T = k_\Phi (h_0 + T_Д), \tag{38}$$

$$h_0 = 0,5H, \tag{39}$$

$$q = \frac{W}{t}. \tag{40}$$

У залежностях (37)–(40) маємо: $H_Д$ – глибина від поверхні ґрунту до осі дрени, м; a – норма осушення, м; k_Φ – коефіцієнт фільтрації, м/добу; W – шар води, м, який треба відвести з ґрунту протягом часу *t*, діб, визначається за формулою

$$W = h_S + Z + E + \mu a, \tag{41}$$

де h_S – шар води, що залишився на поверхні після сходу весняних або зливових вод, м; Z – шар опадів за розрахунковий період, м; E – шар випаровування за розрахунковий період, м; μ – коефіцієнт водовіддачі, який в даній роботі визначено за формулою (*ДБН…,1999*):

$$\mu = 0,056\sqrt{k_\Phi}\, a^{1/3}, \tag{42}$$

де a – норма осушення, м; k_Φ – коефіцієнт фільтрації, м/добу.

Для подальших розрахунків та аналізу беремо: $h_S = 0$; $Z = E$.

Тоді інтенсивність інфільтраційного живлення визначається як

$$q = \frac{\mu \cdot a}{t}. \quad (43)$$

Ураховуючи вирази (37)–(43), залежності (35) і (36) можна записати у вигляді

$$B = 4\left(\sqrt{\Phi^2 + \frac{k_\Phi^{1/2} t\left[0{,}5\left(H_Д - 0{,}6a\right) + T_Д\right]\left(H_Д - 0{,}6a\right)}{0{,}112a^{4/3}}} - \Phi\right), \quad (44)$$

$$\Phi = \frac{T_Д}{\pi}\ln\left(\frac{2T_Д}{\pi D}\right) + \frac{2\left(H_Д - 0{,}6a\right)}{\pi}\ln\left(\frac{2\left(H_Д - 0{,}6a\right)}{\pi D}\right) + \frac{T_Д \Phi_0}{\pi} + \frac{\left(H_Д - 0{,}6a\right)}{\pi}\Phi_0. \quad (45)$$

Аналізуючи зв'язки між параметрами формул (44) і (45), видно, що

$$B = f(H_Д; T_Д; k_\Phi; a; \Phi_0; t; D), \quad (46)$$

де параметри t і D для кожного конкретного випадку задаються як сталі величини. Решта параметрів функції (46) за своєю природою належить до випадкових величин, тобто мають свою варіацію на площі системи.

Ураховуючи формулу (27) та функціональну залежність (46), середнє квадратичне значення відстаней між дренами дорівнює

$$\sigma_B = \left(\frac{\partial B}{\partial H_Д}\sigma_{H_Д}\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial k_\Phi}\sigma_{k_\Phi}\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial T_Д}\sigma_{T_Д}\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial a}\sigma_a\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial \Phi_{01}}\sigma_{\Phi_0}\right)^2. \quad (47)$$

Для визначення часткових похідних, що входять у формулу (47), використано залежності (44) і (45).

$$\frac{\partial B}{\partial H_Д} = \frac{8}{\pi}\left(\ln\frac{H}{\pi D} + \frac{\Phi_0}{2} + 1\right)\left(\frac{\Phi}{\sqrt{N}} - 1\right) + \frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{k_\Phi^{1/2} t\left(H + T_Д\right)}{0{,}112a^{4/3}}; \quad (48)$$

$$\frac{\partial B}{\partial k_\Phi} = \frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{t\left(0{,}5H + T_Д\right) H}{\sqrt{k_\Phi}\ 0{,}224a^{4/3}}; \quad (49)$$

$$\frac{\partial B}{\partial T_Д} = \frac{4}{\pi}\left(\ln\frac{2T_Д}{\pi D} + \Phi_0 + 1\right)\left(\frac{\Phi}{\sqrt{N}} - 1\right) + \frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{k_\Phi^{1/2} t\ H}{0{,}112a^{4/3}}; \quad (50)$$

$$\frac{\partial B}{\partial T_Д} = \frac{4}{\pi}\left(\ln\frac{2T_Д}{\pi D} + \Phi_0 + 1\right)\left(\frac{\Phi}{\sqrt{N}} - 1\right) + \frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{k_\Phi^{1/2} t\ H}{0{,}112a^{4/3}}; \quad (51)$$

$$\frac{\partial B}{\partial a} = \frac{4{,}8}{\pi}\left(\ln\frac{2H}{\pi D} + \frac{\Phi_0}{2} + 1\right)\left(1 - \frac{\Phi}{\sqrt{N}}\right) - \frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{k_\Phi^{1/2} t\left[0{,}6\left(H + T_Д\right) a + \frac{4}{3}\left(0{,}5H^2 + HT_Д\right)\right]}{0{,}112a^{7/3}}; \quad (52)$$

$$\frac{\partial B}{\partial \Phi_0} = \frac{4}{\pi}\left(T_Д + H\right)\left(\frac{\Phi}{\sqrt{N}} - 1\right). \quad (53)$$

У формулах (48) – (53) N – параметр, що дорівнює

$$N = \Phi^2 + \frac{k_\Phi^{1/2} t\left[0{,}5\left(H_Д - 0{,}6a\right) + T_Д\right]\left(H_Д - 0{,}6a\right)}{0{,}112a^{4/3}}. \quad (54)$$

Для визначення величини σ_B використано нормативні допуски та дані досліджень щодо зміни коефіцієнтів фільтрації в придренній зоні (*Мелиорация…, 1985*).

Аналіз впливовості параметрів на відстань між дренами виконано шляхом комп'ютерного експерименту за варіантами, які розглядають такі змінні умови:

- за нормою осушення $a = 0{,}5;\ 0{,}6;\ 0{,}7;\ 0{,}8\ м$;
- за тривалістю зниження рівня ґрунтових вод $t = 2; 4; 7; 10\ діб$;
- за коефіцієнтом фільтрації $k_\Phi = 0{,}5;\ 1{,}0\ м/добу$;
- за глибиною закладання дрени $H_Д = 1\ м$;
- за відстанню від осі дрени до водотриву $T_Д = 2\ м$.

Розглянуто дрени з гончарних труб, зовнішній діаметр яких $D = 0{,}055\ м$. Фільтраційні опори $\Phi_0 = 1$.

Відповідно до залежності (32) максимальне відхилення випадкової величини від її середнього значення можна записати так

$$\Delta x = 3\sigma_x = 3V_x\bar{x}, \quad (55)$$

де V_x – коефіцієнт варіації випадкової величини x.

Ураховуючи рекомендації (*ДБН…,1999*) для розрахунків, прийнято:

Δa_{max} = 0,1 м; $\Delta k_{\Phi max}$ = 0,1 м; $\Delta T_{Дmax}$= 0,15$T_Д$;
$V_{k\Phi}$ = 0,0333; $V_{TД}$ = 0,05; $V_{НД}$ = 0,015; $V_{\Phi O}$ = 0,05.

Відповідно:

σ_a = 0,0333; $\sigma_{k\Phi}$ = 0,0333k_Φ; $\sigma_{TД}$ = 0,05$T_Д$;
$\sigma_{НД}$ = 0,015; $\sigma_{\Phi O}$ = 0,05Φ_0.

У розрахунках величини σ_B та B ряд проміжних розрахункових величин позначено таким чином:

$$\Pi_H = \left(\frac{\partial B}{\partial H_Д}\sigma_{H_Д}\right)^2;\ \Pi_k = \left(\frac{\partial B}{\partial k_\Phi}\sigma_{k_\Phi}\right)^2;$$

$$\Pi_T = \left(\frac{\partial B}{\partial T_Д}\sigma_{T_Д}\right)^2; \quad (56)$$

$$\Pi_a = \left(\frac{\partial B}{\partial a}\sigma_a\right)^2;\ \Pi_\Phi = \left(\frac{\partial B}{\partial \Phi_0}\sigma_{\Phi_0}\right)^2.$$

За результатами машинного експеримента побудовано гістограму впливовості мінливих природних і технологічних (конструктивних) чинників на величину відстані між дренами (рис. 3). Відповідні параметри Π_i на рис. 3 представлені у відсотках від σ_B^2. З рис. 3 видно, що найбільш впливовим параметром на значення B є норма осушення, питома вага якої у σ_B^2 досягає 84...94 %. При цьому вагомість впливу коефіцієнта фільтрації становить лише 2...4 %.

Оскільки функціональна ефективність (або гідрогеологічна дія) дренажу проявляється через дренованість території загалом, то її основними показниками є норма осушення і час відведення надлишкової води, які відображають інтенсивність осушення території, що традиційно представляється тотожним параметром – модулем дренажного стоку. Отже, найвагомішим показником при визначенні відстаней між дренами ***є модуль дренажного стоку***, питома вага якого становить 86…98 %.

Оскільки модуль дренажного стоку має виражений імовірнісний характер формування, то виникає необхідність у визначенні імовірнісних інтервалів його величини та розрахунку довірчих інтервалів міждренних відстаней.

Наведені вище розрахунки в рамках машинного експерименту дають змогу виконати імовірнісне оцінювання відстаней між дренами *B* за заданої необхідної імовірності довіри β.

Так, наприклад, при *t* = 4 доби, k_Φ = 0,5 м/добу, *a* = 0,5; 0,6; 0,7; 0,8 м, межі довірчого інтервалу для *B*, при імовірності довіри *β* = 0,90, наведено в табл. 1 та проілюстровано на рис. 4.

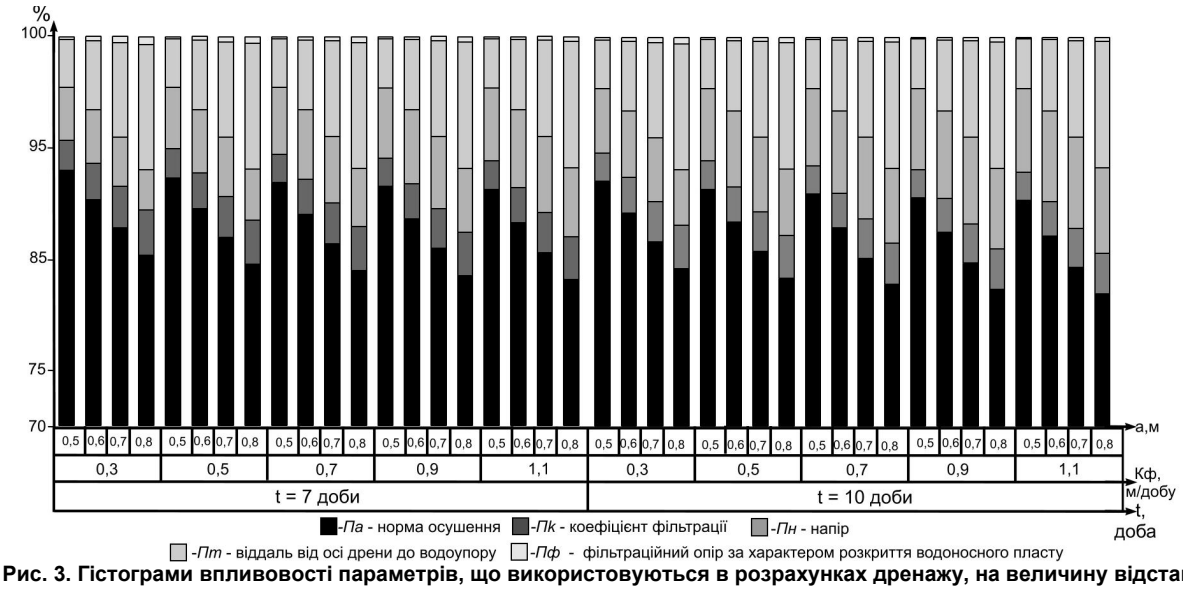

Рис. 3. Гістограми впливовості параметрів, що використовуються в розрахунках дренажу, на величину відстані між дренами для різного часу зниження РГВ або відведення надлишкової вологи (від 2 до 10 діб)

Таблиця 1

Межі довірчого інтервалу для відстаней між дренами *B* за імовірності довіри *β* = 0,90 і *t* = 4 доби

$k_ф$, м/добу	*a*, м	*B*, м	σ_B, м	$\Delta B = t_\beta \sigma_B$, м	B_{min}, м	B_{max}, м	$\frac{\Delta B}{B}\cdot 100\%$
0,5	0,5	28,48	2,31	3,80	24,68	32,28	13,34
	0,6	22,78	1,71	2,81	19,97	25,59	12,35
	0,7	18,49	1,34	2,20	16,29	20,69	11,92
	0,8	15,12	1,08	1,78	13,34	16,90	11,75

З порівняння середніх значень відстаней *B*, які обчислені за формулою (46), з межами довірчих інтервалів B_{min} і B_{max}, що відповідають довірчій імовірності β = 0,90, видно, що при нормах осушення *a* = 0,5...0,8 м – B_{min} у 1,12...1,17 разів менші, а B_{max} у 1,10...1,15 разів більші за відповідні значення *B*, які обчислені за середніх значень параметрів за формулою (47).

Аналогічне порівняння за довірчої імовірності β = 0,99 показує, що B_{min} у 1,18...1,30 разів менші, а B_{max} у 1,16...1,23 разів більші за середні значення *B*.

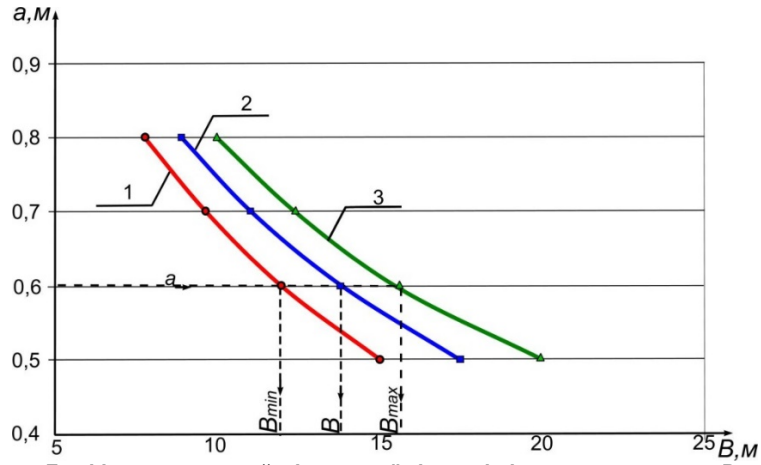

Рис. 4. Графіки залежностей міждренної відстані від норми осушення *B* = *f*(*a*):
1 – B_{min}= *f*(*a*); 2 – *B* = *f*(*a*); 3 – B_{max}= *f*(*a*)

Отже, на основі запропонованого імовірнісного підходу до оцінювання міждренних відстаней для дренажних систем відстані між дренами, які обчислено за формулою (35), можна збільшити в 1,10...1,23 разів (імовірність неперевищення дорівнює P_U = 0,90...0,99).

Висновки. Міждренна відстань є найбільш інформативним параметром, що визначає інтенсивність водовідведення, проявляє залежність ефективності та вартості дренажної системи від фільтраційних характеристик. З метою вибору чинників, що найбільше впливають на параметри дренажу та модуль дренажного стоку, виконано аналіз гідромеханічних та емпіричних рівнянь з визначення міждренних відстаней.

За результатами проведених статистичних розрахунків визначено, що модуль дренажного стоку, який характеризує інтенсивність осушення територій, а отже, тісно пов'язаний з міждренними відстанями, визначається переважно величиною норми осушення та часу відведення надлишкової вологи. Саме норма осушення найбільше серед п'яти проаналізованих показників впливає на величину міждренної відстані. Питома вага її впливу сягає 84...94 %. Вагомість впливу коефіцієнта фільтрації становить лише 2...4 %. Звідси випливає, що найбільш важливим показником при визначенні відстаней між дренами є модуль дренажного стоку, питома вага якого – 86…98 %.

Запропоновано імовірнісний підхід до оцінювання міждренних відстаней на системах із закритим дренажем. При його застосуванні встановлено, що відстані між регулювальними дренами можна збільшити в 1,10...1,23 рази, що дозволяє отримати значну економію витрат при будівництві систем.

Допускається, що в різних кліматичних зонах і ландшафтах на домінантні позиції за впливом на міждренну відстань можуть вийти інші чинники та показники. Тому доцільно продовжувати обґрунтування міждренних відстаней за різних умов формування підвищених рівнів ґрунтових вод і призначених норм осушення. Визначення оптимальних параметрів дренажу дуже важливе для встановлення раціональної вартості дренажної системи на етапі її проектування та обумовлено доцільністю розрідження мережі дрен на осушувально-зволожувальних системах у зв'язку з регіональним зниженням РГВ під впливом потепління клімату.

Список використаних джерел

Вентцель, Е.С. (1969). Теория вероятностей. Москва.

Гадзала, Я.М., Сташук, В.А., Рокочинський, А.М. (Ред.) (2017). Меліорація та облаштування Українського Полісся. Херсон.

ДБН В. 2.4–1–99 (1999). Меліоративні системи та споруди. Київ.

Ивицкий, А.И. (1988). Основы проектирования и расчетов осушительных и осушительно-увлажнительных систем. Минск.

Ивицкий, А.И., Афанасик, Г.И., Михальцевич, А.И. (1979). Проектирование и расчеты регулирующей сети осушительно-увлажнительных систем на торфяных почвах (рекомендации). Минск.

Ионат, В.А. (1962). Расчет горизонтального дренажа в неоднородных грунтах. Таллин.

Козлов, В.С. (1940). Расчет дренажных сооружений. Москва.

Костяков, А.Н. (1960). Основы мелиорации. Москва.

Мажайский, Ю.А., Рокочинский, А.Н., Волчек, А.А., Мешик, О.П., Езнах Е. (Ред.) (2017). Природообустройство Полесья. Монография в 4 кн. Кн. 2: Украинское Полесье. ISBN 978-5-00077-654-4

Мелиорация и водное хозяйство. (1985). Т.3. Осушение: Справочник. Под ред. Б.С. Маслова. Москва.

Минаев, И.В. (1985). О расчете расстояний между дренами. *Гидротехника и мелиорация*, 2, 41-44.

Мурашко, А.И. (1982). Сельскохозяйственный дренаж в гумидной зоне. Москва, 272.

Науменко, І.І. (1994). Надійність споруд гідромеліоративних систем. Київ.

Науменко, І.І., Токар, Л.О. (2001). Розрахунок віддалей між дренами осушувально-зволожувальних систем як функції випадкових величин. *Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво. Збірник наукових праць,* 26, 83–94.

Олейник, А. Я. (1981). Геогидродинамика дренажа. Киев.

Олейник, А.Я., Поляков, В.Л. (1987). Дренаж переувлажненных земель. Киев.

Писарьков, Х. А. (1978). Гидротехнические мелиорации лесных земель. Москва.

Поляков, В.Л. (2016). Расчет действия одиночной несовершенной горизонтальной дрены в неограниченном в плане пласте с учетом зоны аэрации. *Гидротехническое строительство*, 5, 21-31.

Цуман, Н.В. (2014). Оцінка ефективності сучасного використання осушених земель в зоні Полісся. *Науково-практичний журнал. Екологічні науки,* 6, 62-68.

Шкинкис, Ц.Н. (1981). Гидрологическое действие дренажа. Ленинград.

Янголь, А.М. (1965). Рекомендации по увлажнению осушаемых земель. Киев.

Chen, X., Wang, D., Chopra, M. (2013). Constructing comprehensive datasets for understanding human and climate change impacts on hydrologic cycle. *Irrigationand Drainage systems Engineering,* 2(1), 106. https://doi.org/10.4172/2168-9768.1000106.

Der Pboeg, R.R.V., Kirkham, M.B., Marquardt, M. (1999). The Golding equation for soil drainage: Its origin, evolution and use. *Soil Science Society of America Journal*, 63, 33-39.

Halbac-Cotoara-Zamfir, R., Costescu, I.-A. (2010). Calculation of distance between drains in controlled regime. *Research Journal of Agricultural Science*, 42 (3), 154-160.

Kovalenko, P., Rokochinskiy, A., Jeznach, J., Volk, P., Koptyuk, R., Prykhodko, N. (2019). Evaluation of climate change in polissia region and ways of adaptation to it. *Journal of WaterandL and Development*, 41(1), 72–82. https://content.sciendo.com/view/journals/jwld/41/1/article-p77.xml. https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0030

Rokochinskiy, A., Volk, P., Pinchuk, O., Turcheniuk, V., Frolenkova, N., Gerasimov, E. (2019). Forecasted estimation of the efficiency of agricultural drainage on drained lands. *Journal of Water and Land Development*, 40(1), 149–153. https://content.sciendo.com/view/journals/jwld/40/1/article-p149.xml. https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0016

Rothe, I. (1863). Strangent fernung bei Draungen. – Land mirtshafliche Jahrbucher, 1924, G.5 DUPUTT J. Etude's theorigues es pratiguessur le movement des caux. Pari.

Vrugh, J.A., Bouten, W., Gupta, H.V., Hopmans, J.W. (2003). Toward improved identifiability of soil hydraulic parameters: On the selection of a suitable parametric model. *Vadoze Zone Journal*, 2, 98–113.

References

Chen, X., Wang, D., Chopra, M. (2013). Constructing comprehensive datasets for understanding human and climate change impacts on hydrologic cycle. *Irrigationand Drainage systems Engineering,* 2(1), 106. https://doi.org/10.4172/2168-9768.1000106.

DBN V. 2.4–1–99 (1999). Reclamation systems and structures. Kyiv. [in Ukrainian]

Der Pboeg, R.R.V., Kirkham, M.B., Marquardt, M. (1999). The Golding equation for soil drainage: Its origin, evolution and use. *Soil Science Society of America Journal*, 63, 33–39.

Gadzala, J.M., Stashuk, V.A., Rokochynsky, A.M. (Eds.) (2017). Land Reclamation and arrangement of Ukrainian Polissya. Collective monograph. Kherson. [in Ukrainian]

Halbac-Cotoara-Zamfir, R., Costescu, I.-A. (2010). Calculation of distance between drains in controlled regime. *Research Journal of Agricultural Science*, 42 (3), 154–160.

Ionat, V.A. (1962). Calculation of horizontal drainage in heterogeneous soils. Tallinn. [in Russian]

Ivitsky, A.I. (1988). Basics of design and calculation of drainage and drainage-humidification systems. Minsk. [in Russian]

Ivitsky, A.I., Afanasyk, G.I., Mikhaltsevich, A.I. (1979). Design and calculations of the regulatory network of drainage and humidification systems on peat soils (recommendations). Minsk. [in Russian]

Kostyakov, A.N. (1960). Fundamentals of land reclamation. Moscow. [in Russian]

Kovalenko, P., Rokochinskiy, A., Jeznach, J., Volk, P., Koptyuk, R., Prykhodko, N. (2019). Evaluation of climate change in polissia region and ways of adaptation to it. *Journal of WaterandL and Development*, 41(1), 72–82. https://content.sciendo.com/view/journals/jwld/41/1/article-p77.xml. https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0030

Kozlov, V.S. (1940). Calculation of drainage structures. Moscow. [in Russian]

Land reclamation and water management. (1985). Drainage. Handbook. B.S. Maslov (Eds.). Moscow. [in Russian]

Mazhaisky, Yu.A., Rokochinsky, A.N., Volchek, A.A., Meshik, O.P., Eznakha E. (Eds.) (2017). Nature improvement of Polesie. Monograph in 4 kn. Book. 2: Ukrainian Polesie. ISBN 978-5-00077-654-4. [in Russian]

Minaev, I.V. (1985). About calculating the distance between drains. *Hydraulic engineering and land reclamation,* 2, 41-44. [in Russian]

Murashko, A.I. (1982). Agricultural drainage in the humid zone. Moscow. [in Russian]

Naumenko, I.I. (1994). Reliability of hydro-ameliorative systems. Kyiv. [in Ukrainian]

Naumenko, I.I., Tokar, L.O. (2001). Calculation of distances between drains of drainage and humidification systems as a function of random variables. *Hydromelioration and hydraulic engineering construction. Collection of scientific works*, 26, 83-94. [in Ukrainian]

Oleinik, A.Ya. (1981). Drainage geohydrodynamics. Kiev. [in Russian]

Oleinik, A.Ya., Polyakov, V.L. (1987). Drainage of wetlands. Kiev. [in Russian]

Pisarkov, Kh.A. (1978). Hydrotechnical reclamation of forest lands. Moscow. [in Russian]

Polyakov, V.L. (2016). Calculation of the action of a single imperfect horizontal drain in an unlimited reservoir in terms of the aeration zone. *Hydraulic engineering*, 5, 21–31. [in Russian]

Rokochinskiy, A., Volk, P., Pinchuk, O., Turcheniuk, V., Frolenkova, N., Gerasimov, E. (2019). Forecasted estimation of the efficiency of agricultural drainage on drained lands.*Journal of Water and Land Development*, 40(1), 149–153. https://content.sciendo.com/view/journals/jwld/40/1/article-p149.xml. https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0016

Rothe, I. (1863). Strangent fernung bei Draungen. – Land mirtshafliche Jahrbucher, 1924, G.5 DUPUTT J. Etude's theorigues es pratiguessur le movement des caux. Pari.

Shkinkis, Ts.N. (1981). Hydrological drainage action. - Leningrad: Gidrometeoizdat. [in Russian]

Tsuman, N.V. (2014). Estimation of efficiency of modern use of drained lands in the Polissya zone. *Scientific and practical journal. Environmental sciences*, 6, 62–-68. [in Ukrainian]

Vrugh, J.A., Bouten, W., Gupta, H.V., Hopmans, J.W. (2003). Toward improved identifiability of soil hydraulic parameters: On the selection of a suitable parametric model. *Vadoze Zone Journal*, 2, 98-113.

Wentzel, E.S. (1969). Probability theory. Moscow. [in Russian]

Yangol, A.M. (1965). Recommendations for the moistening of drained lands. Kiev. [in Russian]

Надійшла до редколегії 19.10.2020

A. Rokochinskiy[1], Dr. Sci. (Tech.), Prof.,
E-mail: a.m.rokochinskiy@nuwm.edu.ua;
P. Volk[1], Cand. Sci. (Tech.), Associate prof.,
E-mail: p.p.volk@nuwm.edu.ua;
L. Tokar[1], Cand. Sci. (Tech.), Associate prof.,
E-mail: l.o.tokar@nuwm.edu.ua;
O.Shevchenko[2], Dr. Sci. (Geol.), Senior Resercher,
E-mail: shevch62@gmail.com;
V. Turchenyuk[1], Dr. Sci. (Tech.), Prof.,
E-mail: fwg@ukr.net;
L. Volk, Cand. Sci. (Tech.), Associate Prof.,
E-mail: l.r.volk@ukr.net;
[1]National University of Water and Environmental Engineering
11 Soborna Str., Rivne, 33000, Ukraine;
[2]Ukrainian Hydrometeorological Institute NASof Ukraine,
37 Nauki Ave., Kyiv, 03028, Ukraine

DRAINAGE MODULE – AN IMPORTANT INDICATOR OF THE HYDROLOGICAL EFFECT OF THE DRAINAGE

Filtration calculations of drainage are a fundamental task of reclamation hydrogeology. They are necessary both during irrigation of lands (prevention of salinization) and during their drainage. The most important parameters of closed drainage, as the main means of regulating the level of groundwater and their runoff to water intakes, are the distance between the drains and the depth of drainage. These parameters depend on a combination of hydrogeological, climatic and relief-forming factors. Drainage degree of the territory is characterized by a drainage module. The value of the drainage module provides the water removing from the soil to the required drainage rate for a specified period and is one of the factors of the hydrological effect of the drainage. Existing equations for the calculation of distances between the drains are analyzed. Two methods of calculating agricultural drainage parameters are presented: a hydromechanical method based on theoretical principles of water movement in natural and technical systems and an empirical method based on the statistical data processing of field researches. These methods have both advantages and disadvantages. They include many factors of drainage parameters that represent the technical, economic and environmental effect of drainage. On the basis of the research results, a structural and logical scheme is presented. This scheme describes the influence of hydrological conditions (climatic, soil, relief) and the hydrological effect of drainage on drainage parameters of drained territories. To investigate the influence of variability of the main factors on the distance between the drains, we used the equation with DBN B.2.4-1-99. Also, we took into account the results of the researches of O.J. Oliynyk and A.I. Murashko. Methods of statistical modeling and methods of probability theory were also used. Based on these methods, mathematical models have been developed to determine the standard deviation of the function factor. The drainage module, which characterizes the intensity of soil and territory drainage, is formed by the value of drainage rate, filtration rate, and excess water drainage time. Also, the drainage module has a great influence on the distance between the drains (86 % ... 98 %). Based on the probabilistic method of estimating the drainage module, it is calculated that the distance between the drains can be increased by 1.10...1.23 times (probability of non-exceeding P_U = 0.95...0.99) without reducing their efficiency.

Keywords: drainage module, distance between the drains, groundwater level, drainage norm, methods of data processing, factors, drainage efficiency

А. Рокочинский[1], д-р техн. наук, проф.,
E-mail: a.m.rokochinskiy@nuwm.edu.ua;
П. Волк[1], канд. техн. наук, доц.,
E-mail: p.p.volk@nuwm.edu.ua;
Л. Токар[1], канд. техн. наук, доц.,
E-mail:l.o.tokar@nuwm.edu.ua;
А. Шевченко[2], д-р геол. наук, ст. науч. сотр.,
E-mail: shevch62@gmail.com;
В. Турченюк[1], д-р техн. наук, проф.,
E-mail: fwg@ukr.net;
Л. Волк[1], канд. техн. наук, доц.,
E-mail: l.r.volk@ukr.net;
Национальный университет водного хозяйства и природопользования,
ул. Соборная, 11, г. Ровно, 33000, Украина;
Украинский гидрометеорологический институт НАН Украины и ГСЧС Украины,
пр. Науки, 37, г. Киев, 03028, Украина

МОДУЛЬ ДРЕНАЖНОГО СТОКА КАК ОПРЕДЕЛЯЮЩИЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ЭФЕКТИВНОГО ДЕЙСТВИЯ ДРЕНАЖА

Фильтрационные расчеты дренажа являются основной задачей мелиоративной гидрогеологии. Они необходимы как при орошении земель (предотвращение засоления), так и при осушении. Важнейшими параметрами закрытого дренажа, как основного регулятора уровня грунтовых вод и их стока в водоприемники, является расстояние между дренами и глубина их заложения. Эти параметры зависят от сочетания гидрогеологических, климатических и рельефообразующих факторов. Дренированность территории характеризуется модулем дренажного стока, величина которого обеспечивает отвод лишней воды из почвы до необходимой нормы осушения за определенный период времени и является одним из факторов гидрогеологического действия дренажа. Для определения факторов, которые влияют на расчетные параметры дренажа, проанализированы зависимости для расчета расстояния между дренами, используемые в отечественной и зарубежной практике и относящиеся к двум методам расчета параметров дренажа: гидромеханическому и эмпирическому. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки и отражает сложность и множественность факторов параметров дренажа, которые определяют технический, экономический и экологический эффект его работы. По результатам исследования сформирована и представлена структурно-логическая схема, которая отражает влияние гидрологических условий (климатических, гидрогеологических, рельефных) и проектных показателей эффективного действия дренажа (норма осушения, время, скорость и объемы водоотведения) на его расчетные параметры (модуль дренажного стока, междренное расстояние, расстояние от оси дрены до водоупоров, диаметр дрены, характеристики фильтра и т.д.). Эти три группы факторов и показателей являются элементами сложной многопараметрической модели. Для исследования влияния изменчивости основных факторов на расстояния между дренами использована общепринятая формула (согласно ДБН В.2.4-1-99) с учетом разработок А.Я. Олейника и А.И. Мурашко, которая достаточно точно учитывает конструктивные особенности материального горизонтального дренажа. Применены методы статистического моделирования и методы теории вероятности, с помощью которых разработаны математические модели. Таким образом, по результатам проведенных исследований установлено, что модуль дренажного стока, который характеризует интенсивность осушения почвы и территории, связанный преимущественно с величинами нормы осушения, коэффициента фильтрации и времени отвода избыточной воды, оказывает существенное влияние на величину расстояния между дренами (86...98 %). Кроме того, на основе предложенного вероятностного способа оценки модуля дренажного стока рассчитано, что расстояния между дренами можно увеличить в 1,10...1,23 раза без существенного уменьшения эффективности их работы.

Ключевые слова: модуль дренажного стока, междренное расстояние, неустановившееся движение, уровень грунтовых вод, норма осушения, методы расчета, факторы, эффективность действия дренажа.