

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202101-284>

Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/284>

УДК 626.81/84:631.67

ГІДРОДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ СТОКУ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ДРЕНАЖУ В УМОВАХ БЕЗСТІЧНИХ І СЛАБОДРЕНОВАНИХ ЗРОШУВАНИХ ЗЕМЕЛЬ СУХОСТЕПОВОЇ ЗОНИ УКРАЇНИ

В.В. Морозов¹, канд. с.-г. наук, О.В. Морозов², докт. с.-г. наук, Є.В. Козленко³, канд. с.-г. наук

¹ Херсонський державний аграрно - економічний університет, Херсон, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-2594-883X>; e-mail: morozov17041950@gmail.com;

² Херсонський державний аграрно - економічний університет, Херсон, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-5617-0813>; e-mail: morozov-2008@ukr.net;

³ Інститут зрошувального землеробства НААН, Херсон, Україна;
<https://orcid.org/0000-0003-3001-8220>; e-mail: evgsn@i.ua

Анотація. У статті наведені результати досліджень, на основі яких одержана гідродинамічна модель формування дренажного стоку закритого горизонтального дренажу на безстічних і слабодренованих зрошуваних землях у сухостеповій зоні України. Актуальність досліджень полягає в їх необхідності при проектуванні систем горизонтального дренажу, визначенні оптимальних міждренних відстаней, режимів функціонування та оцінки ефективності дренажу при його експлуатації в умовах зрошення сучасною дощувальною технікою із закритою внутрішньогосподарської мережі. Мета дослідження – розробка узагальненої гідродинамічної моделі формування стоку закритого горизонтального дренажу на фоні зрошення із закритою внутрішньогосподарської мережі на безстічних і слабодренованих землях, якими характеризуються водороздільні рівнини та приморські низовини сухостепової зони України. Завдання дослідження: визначення основних умов і факторів формування стоку горизонтального дренажу; визначення структури притоку ґрунтової води до дрен при оптимальних міждренних відстанях закритої внутрішньогосподарської мережі; визначення перспектив та напрямів подальших досліджень. Методи і методика дослідження: багаторічні (1975–2020 рр.) польові досліді на дренажних ділянках із різними міждренними відстанями в типових гідрогеологічних умовах для водороздільних масивів та приморських низовин; водобалансові дослідження; теоретичні методи дослідження (аналіз і синтез, порівняння, узагальнення, районування); для визначення структури притоку ґрунтових вод до дрен застосовано метод електрогідродинамічних аналогій на лабораторному інтеграторі ЕГДА 9/60. В результаті дослідження визначено, що в умовах закритої водогосподарської мережі можливо збільшення міждренних відстаней від 120–220 м до 240–400 м. При всіх вивчених умовах безстічних та слабодренованих водороздільних рівнин і приморських низовин основними джерелами, що формують режим ґрунтових вод і дренажного стоку, є атмосферні опади 420 мм або 55,0% приходної частини водного балансу, зрошувальна вода – 340 мм або 45,0% приходної частини, в тому числі 266 мм або 35,0% від поливів і 75 мм або 10,0% від фільтрації з каналів. Аналіз гідродинамічної моделі формування дренажного стоку показує, що при дренажних відстанях 240–400 м приток із зони вище дна дрени складає 2,6–4,8% від загального притоку до дрени. Висхідний потік під дном дрени попадає до неї під середнім кутом 60° і складає при всіх варіантах міждренної відстані 95,2–97,2% загального притоку. При збільшенні відстані між дренами з 240 до 300–400 м горизонтальний приток із зони нижче дна дрени зменшується при відповідному збільшенні висхідного потоку під дном дрени. Середня ширина висхідного потоку до дрени на межі активної зони ґрунтових вод (9,0–10,0 м нижче дрен) дорівнює 13,0–20,0 м. Одержана модель доповнює існуючу теоретико-методичну базу знань для проектування горизонтального дренажу і необхідна в перспективних дослідженнях із формування експертних систем для оптимізації параметрів і режимів функціонування зрошення і дренажу в умовах сучасної широкозахватної дощувальної техніки з поливом із закритою внутрішньогосподарської мережі.

Ключові слова: зрошення, дренаж горизонтальний, формування дренажного стоку, гідродинамічна модель, сухостепова зона

Актуальність дослідження. Стратегія зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 р. вказує, що в сучасних умовах їх відновлення є ключовим фактором розвитку аграрного сектора економіки, нарощування експортного потенціалу України, мінімізації впливу глобальних і регіональних змін клімату на процеси соціально-економічного розвитку регіонів [1]. На безстічних і слабодренованих землях сухостепової зони України, яка охоплює Херсонську, Миколаївську, Одеську, Запорізьку області та АР Крим, штучний дренаж є необхідним радикальним еколого – меліоративним заходом для забезпечення відповідного еколого – меліоративного стану зрошуваних земель. Найбільше розповсюдження на зрошуваних масивах сухостепової зони мають системи систематичного закритого горизонтального дренажу.

При відновленні і подальшому розвитку зрошення передбачається реконструкція і модернізація існуючого дренажу, а також проектування і будівництво нових систем закритого горизонтального дренажу. До того ж актуальним є узагальнення накопиченого науково-виробничого досвіду з усіх аспектів інженерних вишукувань, проектування, будівництва та експлуатації систем закритого горизонтального дренажу.

При обґрунтуванні оптимальних параметрів і режимів роботи горизонтального дренажу, оцінки його ефективності на безстічних і слабодренованих землях необхідною є інформація, яка характеризує гідродинамічну модель формування дренажного стоку в умовах сучасної закритої внутрішньогосподарської зрошувальної мережі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Фундаментальні основи проектування закритого горизонтального дренажу, визначення його оптимальних параметрів та формування дренажного стоку висвітлені в роботах класиків вітчизняної меліоративної науки [2; 3; 4; 14]. Проектуванням, будівництвом та дослідженням ефективності горизонтального дренажу в зоні зрошення України займалися вчені УкрНДІГіМ (нині – ІВПіМ НААН), УКРДПРОВОДГОСПу (нині – ВАТ «Укрводпроект»), Інституту ґрунтознавства і агрохімії імені О.Н. Соколовського (нині – ННЦ «ІА імені О.Н. Соколовського»), Херсонського сільськогосподарського інституту (нині – Херсонський державний аграрно-економічний університет), Каховської, Одеської і Кримської гідрогеолого-меліоративних експедицій та регіональних проектних організацій [4; 9; 10; 11; 12; 15; 16].

Класифікація гідрогеологічних умов зрошуваних масивів (Кац Д.М., 1976) [5] показує, що основні зрошувальні системи в Південному регіоні України розташовані в умовах слабодренованих та безстічних територій.

Чл.-кор. НАН України Олійником О.Я. розроблено основи фільтраційних розрахунків горизонтального дренажу в складних гідрогеологічних умовах стосовно до задач меліорації земель аридної зони, проведені теоретичні фільтраційні дослідження до різних варіантів дрен [6], які спрямовані на визначення оптимальних параметрів горизонтального дренажу.

Теоретичне обґрунтування підходу до моделювання дренажних систем, що сформульоване і розроблене Поляковим В.Л. [7], дозволяє розробляти надійні методи інженерних розрахунків дренажу. Однак, як відмічає сам автор (Поляков В.Л., 2018), для повноцінної реалізації запропонованого підходу необхідно мати в повному обсязі відповідну інформацію [7]. На формування бази даних фактичної інформації, яка необхідна в кожних конкретних природно – господарських умовах сухостепової зони для визначення оптимальних параметрів горизонтального дренажу (а це, переважно, міждренні відстані), значною мірою спрямована дана робота.

В роботі [8], автори акцентують увагу на необхідність забезпечення надійними фактичними вихідними даними для інженерних вишукувань, проектування оптимальних параметрів горизонтального дренажу на зрошуваних землях, а також для прогнозування гідрогеолого-меліоративного стану зрошуваних та прилеглих до них земель.

На вивчення умов, факторів і особливостей формування стоку горизонтального дренажу та ефективності його функціонування в різних гідрогеологічних умовах на зрошуваних системах півдня України спрямовані дослідження Савчука Д.П., Шевченка А.М., Бабіцької О.В., Котиковича І.В., Харламова О.І. та ін., що необхідні для відновлення дренажних систем, боротьби з підтопленням земель, для роботи горизонтального дренажу на фоні зрошення із закритою водогосподарською мережі [11; 12]. Формуванню дренажного стоку на сучасних зрошувальних системах півдня України, в тому числі рисових систем, присвячені дослідження [9; 10; 16], формуванню дренажного стоку і його хімічного складу на зрошуваних землях [17; 18] та інших вчених. З цих досліджень витікає, що для кожних регіональних гідрогеологічних умов залишається актуальним питання проведення

досліджень, спрямованих на формування бази даних і бази знань щодо всіх аспектів функціонування горизонтального дренажу, включаючи розробку гідродинамічних моделей формування дренажного стоку.

Мета дослідження – розробка узагальненої гідродинамічної моделі формування стоку закритого горизонтального дренажу на фоні зрошення із закритої внутрішньогосподарської мережі на безстічних і слабодренованих землях, якими характеризуються водороздільні рівнини та приморські низовини сухостепової зони України.

Завданням дослідження є визначення: основних умов і факторів формування стоку горизонтального дренажу; структури притоку ґрунтової води до дрен при оптимальних міждренних відстанях закритої внутрішньогосподарської мережі; перспектив та напрямів подальших досліджень.

Матеріали і методи дослідження. В роботі узагальнені матеріали багаторічних досліджень проблемної Науково-дослідної лабораторії еколого-меліоративного моніторингу агроєкосистем сухостепової зони ім. професора Д.Г. Шапошникова Херсонського державного аграрно-економічного університету, Управління каналів Інгулецької зрошувальної системи, Снігурівської гідрогеолого-меліоративної партії за період 1975–2020 рр.

Основними методами досліджень є польові експерименти з різними варіантами параметрів закритого горизонтального дренажу на дослідно-виробничих ділянках (ДВД) Інгулецької зрошувальної системи, яка є типовою для водороздільних рівнин, та в зоні Північно-Кримського каналу, яка є типовою для приморських низовин. Типовість дослідно-виробничих ділянок для відповідних регіонів обґрунтована методом районування території [5; 15]. Застосовані методи системного

підходу і аналізу, індукції та дедукції, порівняння, аналітичного огляду наукової літератури [15]. Для визначення структури притоку ґрунтових вод до дрен застосовано метод електро-гідродинамічних аналогій (ЕГДА) на лабораторному інтеграторі ЕГДА 9/60 [13].

Результати дослідження та їх обговорення. На зрошуваних слабодренованих і безстічних територіях сухостепової зони основними факторами регулювання водного режиму зрошуваних земель є водоподача і водовідведення, яке здійснюється за допомогою штучного дренажу – горизонтального та вертикального. Закритий горизонтальний дренаж може застосовуватись на більшості зрошуваних земель для попередження і боротьби з їх підтопленням та вторинним засоленням ґрунтів.

Безстічні і слабодреновані землі сухостепової зони України при одношаровій побудові пласта четвертинних лесовидних еолово-делювіальних суглинків із коефіцієнтами фільтрації 0,2–0,7 м/добу характеризуються глибоким заляганням (15,0–20,0 м) водоопіру в червоно-бурих глинах (коефіцієнт фільтрації – 0,0001 м/добу) та середньо- і високомінералізованими ґрунтовими водами (Д.М. Кац, 1976) [5]. На рис. 1 представлені основні гідрогеологічні умови (геофільтраційні схеми), якими характеризуються водороздільні рівнини та приморські низовини сухостепової зони України [5].

Системи закритого горизонтального дренажу почали будувати на півдні України з середини 60-х років минулого століття. Найбільш активних масштабів будівництво горизонтального дренажу набуло в 70-ті, 80-ті роки в Миколаївській, Херсонській, Одеській та АР Крим на Інгулецькій, Краснознам'янській, Татарбунарській, Дунай-Дністровській зрошувальних системах та в зоні Північно – Кримського каналу.

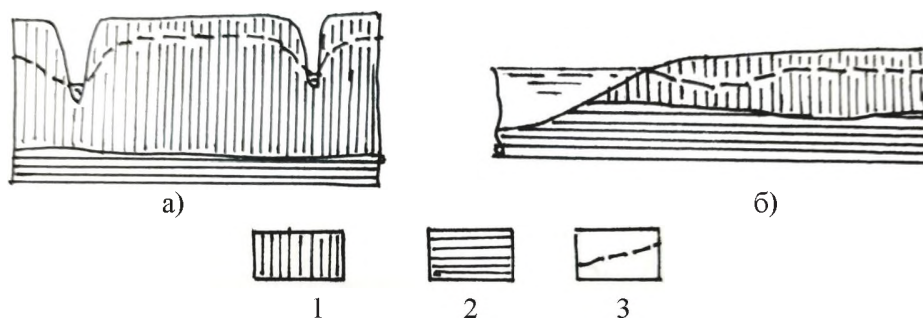


Рис. 1. Основні типи гідрогеологічних умов зрошуваних масивів сухостепової зони України: а – водороздільні рівнини; б – приморські низовини; 1 – еолово-делювіальні лесовидні суглинки; 2 – водоопірні породи (глини); 3 – рівень ґрунтових вод

Джерело: [5]

В дослідженнях, спрямованих на підвищення ефективності закритого горизонтального дренажу, ключове місце займає дренажний стік, який становить собою відведення залишкової гравітаційної води із зони аерації та зони насичення за допомогою дренажної системи. Умови і фактори формування стоку горизонтального дренажу є інформаційною основою при визначенні оптимальних параметрів дренажу та режиму його функціонування.

При визначенні оптимальних параметрів закритого горизонтального дренажу і структури притоку ґрунтової води до дрен у відповідних гідрогеологічних і водогосподарських умовах необхідна узагальнена модель формування дренажного стоку. Для одержання такої моделі на паперовій електричній моделі профільного потоку на інтеграторі ЕГДА 9/60 будувалась гідродинамічна сітка з визначенням на ній розрахункових смуг у придренній зоні для середньобагаторічних умов всіх вивчаємих варіантів із різними міждренними відстанями (240 м, 300 м, 400 м) та середній глибині закладки дрен – 3,0 м (рис. 2). В розрахунках електричної моделі застосовували дані багаторічних досліджень на ДВД горизонтального дренажу.

При даних параметрах дренажу умовах напір ґрунтових вод над дренаю дорівнював 0,5; 0,6 і 0,8 м, що відповідає найбільш розпов-

сюдженому діапазону режиму роботи горизонтального дренажу в сухостеповій зоні України. При інфільтраційному живленні ґрунтових вод їх рух до дрен відмічається в придренній зоні як у горизонтальному, так і вертикальному напрямку. На значній площі міждрення, яке займає близько 80%, відбувається вертикальне переміщення ґрунтових вод, яке пов'язане з гравітацією та гідростатичним тиском інфільтраційних вод. По мірі заглиблення та приближення до дрен низхідні потоки ґрунтової води починають горизонтально переміщуватися в напрямку до дрен (рис. 2).

Враховуючи незначну відмінність у густині ліній току у дрен, а відповідно, і у притоці ґрунтової води до дрени, при всіх досліджуваних відстанях між дренами, які є найбільш поширеними і перспективними для сухостепової зони, можливо уявити загальну схему (модель) формування дренажних вод при функціонуванні закритого горизонтального дренажу. Дана модель необхідна для виявлення кількості ґрунтової води, яка поступає з різних шарів зони насичення, а також для прогнозів впливу багаторічного зрошення і дренажу на еколого-меліоративний стан земель.

При гідродинамічних розрахунках був застосований методичний підхід, запропонований І.К. Дуюновим (1978) [13], згідно з яким рух потоку ґрунтових вод розглядається в 3-х шаровому просторі (рис. 2г):

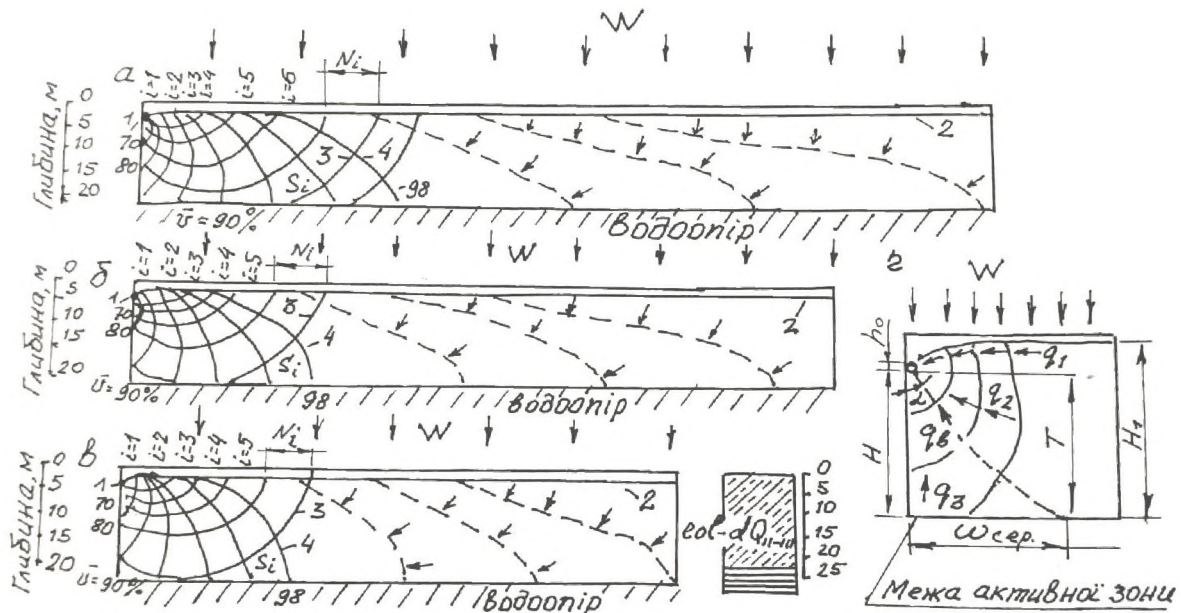


Рис. 2. Гідродинамічна сітка дренажного потоку ґрунтових вод при їх інфільтраційному живленні (W) та різних міждренних відстанях: міждренна відстань: а – 400 м; б – 300 м; в – 240 м; г – основна схема живлення горизонтального дренажу; 1 – дрена; 2 – рівень ґрунтових вод; 3 – лінії току; 4 – лінії рівних потенціалів течії ґрунтових вод

– 1 – вище дна дрени – потік ґрунтових вод під дією гідравлічного ухилу рухається в горизонтальному напрямі до дрени – q_1 ;

– 2 – нижче дна дрени – потік рухається в горизонтальному напрямі під дією аналогічного гідравлічного ухилу до дрени – q_2 ;

– 3 – під дном дрени – висхідний потік ґрунтових вод під дією п'єзометричного тиску рухається неширокою смугою в напрямі до дрени – q_3 .

При аналізі живлення горизонтального дренажу введені означення:

– Q – приток до 1,0 м дрени з одного боку;

– B – половина міждренної відстані;

– h – напір ґрунтових вод у середині міждренної відстані;

– h_0 – наповнення води в дрени ($h_0 = 0,4 - 0,5 d_{др}$);

– $d_{др}$ – діаметр дрени;

– T – потужність активної зони, під якою розуміється такий шар води, по якому відбувається приток води до дрени та в якому відображається вплив інфільтраційного живлення на зміну п'єзометричного напору. В даній схемі T , як це доведено в роботах [13; 14] та підтверджено результатами даних досліджень, не перевищує подвійної – потрійної глибини закладання дрени і приймається рівною 9–10 м;

– H – п'єзометричний напір на глибині T під дном дрени;

– H_1 – п'єзометричний напір у середині міждрення;

– $\omega_{сеп}$ – ширина висхідного потоку води до дрени на межі активної зони формування дренажного стоку;

– W – інтенсивність інфільтраційного живлення ґрунтових вод, що визначається польовими водобалансовими в т. ч. лізиметричними дослідженнями.

Приток ґрунтової води до 1,0 п.м дрени, з одного боку, згідно зі схемою (рис. 2г), буде дорівнювати [10]:

$$Q = q_1 + q_e \quad (1)$$

де:

$$q_e = q_2 + q_3 \quad (2)$$

Відповідно:

$$Q = q_1 + q_e + q_3 \quad (3)$$

де:

$$q_1 = \frac{K \times (h^2 - h_0^2)}{B} \quad (4)$$

$$q_2 = \frac{2 \times k \times T (h - h_0)}{B} \quad (5)$$

$$q_e = q_2 + q_3 = K \times \omega_{сеп} \frac{H - T}{T}, \quad (6)$$

де K – коефіцієнт фільтрації ґрунту, середнє значення – 0,45 м/добу.

$$Q = K \frac{(h^2 - h_0^2)}{B} + K \times \omega_{сеп} \times \frac{H - T}{T}. \quad (7)$$

Отже, при визначеному в результаті досліджень Q , можливо одержати значення q_3 :

$$q_3 = Q - (q_1 + q_2). \quad (8)$$

При відомих значеннях q_2 і q_3 можливо одержати середню смугу висхідного потоку до дрени на межі активної зони $\omega_{сеп}$:

$$\omega_{сеп} = \frac{T \times (q_2 + q_3)}{K \times (H - T)}. \quad (9)$$

Поблизу дрени лінії рівного напору становлять собою дуги концентричних окружностей, тому $\omega_{сеп}$ може визначатися [10] із залежності:

$$\omega_{сеп} = T \times tg\alpha, \quad (10)$$

звідки:

$$tg\alpha = \frac{\omega_{сеп}}{T}, \quad (11)$$

де: α – кут, обмежений вертикальною лінією, що проходить через вісь дрени, та лінією, що огинає зону висхідного потоку q_e під дном дрени.

Узагальнені результати досліджень та розрахунків притоку води, яка поступає в дрени з різних шарів ґрунтових вод, наведені в табл. 1.

Аналіз результатів досліджень та розрахунків показує, що на варіантах із міждренною відстанню $B=400$ м середньобаторічне значення модуля дренажного стоку в не вегетаційний період дорівнює 0,03 л/с з 1 га, що відповідає притоку до дрени з одного боку $Q = 0,05$ м³/добу до 1,0 п. м. При $h = 0,76$ м і $h_0 = 0,05$ м q_1 , визначене за формулою 4, дорівнює 0,001 м³/добу до 1,0 п.м дрени. За формулами 5 і 8 визначені значення q_2 і q_3 , а також їх значення у відсотках від Q . За формулами 9 і 11 визначені $\omega_{сеп}$ та α . В таблиці наведені результати розрахунків витрат води, яка поступає у дрени в характерні періоди року для середньобаторічних кліматичних і водогосподарських умов.

Важливо відзначити, що при різних міждренних відстанях принципових відмінностей між одержаними величинами притоку до дрени та співвідношеннями ґрунтової води, яка поступає у дрени в різні за водністю роки і періоди досліджень, не виявлено.

Аналіз просторової гідродинамічної моделі формування дренажного стоку показує, що

1. Розрахунок притоку води, яка поступає у дрени з різних шарів ґрунтових вод у невегетаційні (Н) та у вегетаційні (В) періоди року

Міждренна відстань	Період року	q , л/с з 1 га	Приток, м ³ /добу до 1 м дрени				Приток, % від Q				$\omega_{\text{сєр}}$ м	α , град.
			Q	q_1	q_2	q_3	q_1	q_2	q_3	$q_2 + q_3$		
240	Н	0,019	0,022	0,001	0,015	0,006	4,5	68,2	27,3	95,5	14,0	57
	В	0,027	0,028	0,001	0,024	0,008	3,6	85,7	10,7	96,4	13,5	56
	за рік	0,023	0,024	0,001	0,020	0,007	4,2	83,3	12,3	95,8	13,8	59
300	Н	0,028	0,036	0,001	0,022	0,013	2,8	61,1	36,1	97,2	14,0	57
	В	0,029	0,038	0,001	0,023	0,014	2,6	60,6	36,8	97,4	14,8	58
	за рік	0,028	0,036	0,001	0,022	0,013	2,7	60,8	36,3	97,1	14,0	57
400	Н	0,041	0,062	0,003	0,042	0,017	4,8	67,7	27,5	95,2	19,7	65
	В	0,043	0,065	0,003	0,044	0,018	4,6	67,7	27,7	95,4	18,9	64
	за рік	0,042	0,063	0,003	0,043	0,017	4,7	67,7	27,6	95,3	19,3	65

при всіх вивчаємих діапазонах міждренної відстані 240–400 м приток із зони вище дна дрени складає всього 2,6–4,8% від загального притоку дрени. Висхідний потік під дном дрени q_0 , що попадає до неї під середнім кутом $\alpha_{\text{сєр}} = 60^\circ$, складає на всіх вивчаємих варіантах горизонтального дренажу 95,2–97,2% загального притоку. При міждренних відстанях менше ніж 240 м відмічається більш висока питома вага притоку до дрени в горизонтальному напрямі нижче дна дрени (q_2). При збільшенні відстані між дренами до 300–400 м значення q_2 зменшуються при відповідному збільшенні висхідного потоку під дном дрени (q_3). Середня ширина висхідного потоку до дрени ($\omega_{\text{сєр}}$) на межі активної зони дорівнює 13,0–20,0 м.

Результати розрахунків притоку води до дрен, що одержані при вивченні гідродинамічних схем функціонування закритого горизонтального дренажу, показують, що в дрени глибиною в середньому 3,0 м, при всіх вивчаємих відстанях між дренами поступає незначна частина інфільтраційних вод, а основна маса ґрунтових вод поступає з нищезалягаючих горизонтів середньо – та більш високомінералізованих ґрунтових вод товщі, що знаходяться на 9,0–10,0 м нижче дрен.

В дослідженнях функціонування закритого горизонтального дренажу і розрахунках щодо збільшення міждренних відстаней при переході на закриту внутрішньогосподарську зрошувальну мережу слід враховувати дренажну дію колекторів – дрен, які формують значну кількість сумарного колекторно – дренажного стоку та у відповідні періоди року залишають дрени, особливо їх верхову частину, сухими

Ці особливості формування дренажного стоку можуть бути використані при розрахунках оптимальних параметрів горизонталь-

ного дренажу в процесі його проектування, в прогнозних розрахунках ефективності функціонування горизонтального дренажу, при оцінці можливості використання дренажних вод для зрошення, а також при оцінюванні технічної та меліоративної ефективності дренажу в процесі його багаторічної експлуатації.

Узагальнення результатів досліджень водного балансу в умовах закритої водогосподарської зрошувальної мережі і горизонтального дренажу показує, що для середньобагаторічних умов формування дренажного стоку при сумарній кількості води, що поступає на 1 га, 7500–7700 м³/га (середнє – 7600 м³/га) ведення при оптимальних параметрах і режимі роботи горизонтального дренажу та нормативному технічному стані дренажних систем досягає 1100–1300 м³ з 1 га (середнє 1200 м³ з 1 га або 0,040 л/с з 1 га) і складає в середньому 15,0% від кількості води, що поступає на 1 га.

Загалом, в сухостеповій зоні на слабодренуваних та безстічних землях середньобагаторічний дренажний стік в умовах закритої внутрішньогосподарської зрошувальної мережі при питомій протяжності горизонтального дренажу 25–42 погонних метра на 1 га, при відсутності відтоку в гідрографічну мережу, складає 12–20% від сумарної кількості води, яка поступає на 1 га. Враховуючи одержані дані можливо стверджувати, що дренажний стік формується, в основному, під впливом інфільтраційного живлення ґрунтових вод атмосферними опадами і поливами (близько 60%) та фільтрації з каналів (40%).

В середньобагаторічному розрізі основними джерелами, що формують режим ґрунтових вод і дренажного стоку на ділянках із горизонтальним дренажем в умовах змін клімату, є атмосферні опади 420,0 мм або

55,0% приходної частини, зрошувальна вода – 340,0 мм або 45,0% приходної частини водного балансу, в тому числі 266,0 мм або 35,0% від поливів і 75,0 мм або 10% від фільтрації із зрошувальних каналів.

Основними витратними статтями водного балансу зрошуваних із закритої водогосподарської мережі та дренажних земель є: сумарне випаровування – 614 мм або 81,0% витратної частини, дренажний стік – 126 мм або 16,5% витратної частини та випаровування з ґрунтових вод – 18,0 мм або 2,4% витратної частини. Для дренажного стоку закритого горизонтального дренажу при іригаційно-кліматичному режимі ґрунтових вод характерним є пік у період вегетаційних поливів і спад в осінне – зимовий період. Дренажний стік складає – 80–90% всіх витрат ґрунтових вод при всіх міждренних відстанях.

Модулі дренажного стоку ефективно працюючого горизонтального дренажу змінюються в широкому діапазоні 0,010–0,090 л/с з 1 га, максимальні їх значення відрізняються в багатоводні по забезпеченості атмосферними опадами роки. При підтримці нижнього порога вологості зрошуваних ґрунтів 0,7–0,8 НВ дренажний стік забезпечують відведення ґрунтових вод в солі з активної товщі ґрунтів та ґрунтоутворних порід (в основному це еолово-делювіальні, середні лесові суглинки з коефіцієнтами фільтрації 0,3–0,5 м/добу), зниження рівня ґрунтових вод до 2,0–2,9 м.

Вищенаведені результати польових і лабораторних досліджень, а також виявлені перерви в дії горизонтального дренажу з питомою протяжністю дрен 30–45 п. м. на 1 га свідчать про можливість збільшення відповідних міждренних відстаней на закритій внутрішньогосподарській зрошувальній мережі на 10–20% і більше, тобто з 120–150 м до 200–400 м. В умовах розрідження дренажної мережі до 25–30 п. м. на 1 га збільшення міждренної відстані середньорічний модуль дренажного стоку може досягати 0,040–0,080 л/с з 1 га.

При переході на закрити внутрішньогосподарську зрошувальну мережу з поливом сучасною дощувальною технікою середньорічний модуль дренажного стоку знижується порівняно з умовами поливу з відкритою зрошувальною мережі і складає в середньому 0,040 л/с з 1 га. Максимальні значення модуля до 0,10 л/с з 1 га відмічаються в період піку вегетаційних поливів в багатоводні по забезпеченості атмосферними водами роки ($P = 5–20\%$), мінімальні значення – 0,005–0,010 л/с з 1 га в осінньо-зимовий період маловодних років ($P = 70–80\%$).

Для визначення терміну функціонування горизонтального дренажу, його фільтра може бути корисна така інформація. В 2013 р. були проведені розкопки азбестоцементної дрени на ДВД в КСП «Баратівське», які показали технічну цілісність базальтового фільтра на дрени, що функціонувала більше 45 років. В 2013 р. був також обстежений технічний стан дрен (азбестоцементних, гончарних і ПВХ) на ДВД в КСП «Україна» в Кримському Присивашші, який показав, що дрени та їх фільтри працювали майже 40 років в проектному режимі, це дозволяє зробити висновок, що горизонтальний дренаж, побудований без технічних порушень, спроможний працювати в проектному режимі понад 40–45 років.

Перспективи подальших досліджень. При обґрунтуванні оптимальних параметрів і режимів роботи закритого горизонтального дренажу на слабодренованих і безстічних зрошуваних землях водороздільних рівнин та приморських низовин сухостепової зони України актуальними питаннями подальших досліджень є: розробка гідрогеохімічних моделей формування дренажних вод у різних за складністю гідрогеохімічних умовах; розробка та апробація методів прогнозів мінералізації та хімічного складу дренажних вод, у тому числі методів водного і сольового балансів, нейронних мереж та ГІС – технологій; питання нормування дренажного гідрохімічного стоку; розвиток методів досліджень водного і сольового балансу зрошуваних дренажних земель; оптимізація еколого-меліоративного режиму зрошуваних ландшафтів; розробка і впровадження експертних систем еколого-меліоративного моніторингу зрошуваних земель, включаючи формування бази даних і бази знань; розробка науково-методичних рекомендацій щодо впровадження результатів досліджень ефективності дренажу при реконструкції, модернізації, проектуванні, будівництві та експлуатації систем горизонтального дренажу в умовах змін клімату та вдосконалення гідромеліоративних систем.

Висновки. Сухостепова зона України, в якій зосереджена найбільша кількість зрошуваних територій, характеризується основними геоморфологічними умовами – водороздільними рівнинами та приморськими низовинами з безстічними і слабодренованими землями. При обґрунтуванні оптимальних параметрів і режимів роботи закритого горизонтального дренажу необхідне визначення умов і факторів формування дренажного стоку та

розробка гідродинамічної моделі формування дренажного стоку в умовах закритої внутрішньогосподарської зрошувальної мережі.

На безстічних і слабодренуваних землях сухостепової зони України дренажний стік, в основному, формується під впливом інфільтраційного живлення ґрунтових вод атмосферними опадами і поливами (близько 60%) та фільтрації з каналів (40%).

Основна маса ґрунтових вод поступає в дренажні труби з товщі, що залягає на 9,0–10,0 м нижче дрени. Дренажний стік на 95% формується за рахунок висхідного потоку ґрунтових вод, що поступає в дрени під кутом 60°. Середня ширина висхідного потоку на нижній межі активності товщі ґрунтових вод дорівнює 13,0–20,0 м.

Для дренажного стоку закритого горизонтального дренажу при іригаційно-кліматичному режимі ґрунтових вод характерним є пік у період вегетаційних поливів і спад в осіннє – зимовий період. Дренажний стік складає – 80–90% всіх витрат ґрунтових вод при збільшенні міждренних відстаней в умовах закритої внутрішньогосподарської мережі з 120–150 до 200–400 м.

Перспективним напрямом подальших досліджень, спрямованих на підвищення технічної та еколого-меліоративної ефективності закритого горизонтального дренажу, є розробка експертних систем еколого-меліоративного моніторингу, які включають формування бази даних і бази знань (в тому числі моделі і прогнози) з урахуванням всіх особливостей функціонування дренажу в умовах зрошення.

Бібліографія

1. Стратегія зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року: схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 14.08.2019 р. № 688-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/688-2019-p#Text>
2. Костяков А.Н. Основы мелиораций: 6-е изд., перераб. и доп. Москва : Сельхозизд, 1960. 622 с.
3. Аверьянов С.Ф. Борьба с засолением орошаемых земель. Москва : Колос, 1978. 288 с.
4. Олейник А.Я., Насиковский В.П., Шапран В.Я. Методы расчета мелиоративного дренажа в сложных гидрогеологических условиях: пособие к расчетам. Киев, 1975. 21 с.
5. Кац Д.М. Влияние орошения на грунтовые воды. Москва : Колос, 1976. 272 с.
6. Олейник А.Я. Геогидродинамика дренажа. Киев : Наукова думка, 1984. 284 с.
7. Поляков В.Л. Расчет неустановившегося действия мелиоративного дренажа с углубленным учетом влияния зоны аэрации и инфильтрации. *Гидродинамика и акустика*. Киев, 2018. Том 1(91), № 1, С. 53–69.
8. Розрахунок і проектування дренажу на зрошувальних системах : навч. посіб. / Доценко В.І. та ін. Дніпро : ДДАЕУ, 2018. 270 с.
9. Тупицын Б.А., Морозов В.В., Колесников В.В., Асатрян В.Т. Причины и условия формирования дренажного стока на орошаемых землях юга Украины. / Тупицын Б.А. та ін. В кн.: *Совершенствования водохозяйственного водоснабжения, гидротехнических сооружений и гидравлических расчетов мелиоративных систем. Тр. Кишиневского с.-х. института*, Кишинев, 1978, С. 119–124.
10. Козленко Є.В., Морозов О.В., Морозов В.В. Інгулецька зрошувальна система: стан, проблеми та перспективи розвитку : монографія / за ред. О.В. Морозова. Херсон : Айлант, 2020. 204 с.
11. Савчук Д., Шевченко А., Бабіцька О., Котикович І., Харламов О., Землянська Д. Особливості відновлення дренажних систем. / Савчук Д. та ін. *Управління водними ресурсами в умовах змін клімату* : матеріали всеукр. наук.-практ. конф. (м. Київ, 21 берез. 2017 р.). Київ, 2017. С. 240–241.
12. Савчук Д.П., Харламов О.І., Котикович І.В. Горизонтальний дренаж на фоні зрошення дощувальною машиною «Фрегат». *Водне господарство України*. 2019, № 1–2. С. 12–18.
13. Дуюнов И.К. Мелиорация земель в условиях напорного питания грунтовых вод. Москва : Колос, 1978. 191 с.
14. Ковда В.А. Почвенный покров, его улучшение, использование и охрана. Москва : Наука, 1981. 183 с.
15. Морозов В.В. Ландшафтні меліорації: навч. посіб. Херсон : Вид-во ХДУ, 2007. 224 с.
16. Дудченко В.В., Корнбергер В.Г., Морозов В.В., Морозов О.В., Дудченко К.В. Рисові зрошувальні системи: використання дренажно-скідних вод : монографія / Дудченко В.В. та ін. Херсон : ФОП Грінь Д.С., 2016. 217 с.
17. Hoffman G. et al. Minimising salt in drain water by irrigation management // *Agricultural Water Management*, 1977, № 3, P. 233–252.

18. Meek B. et al. Chemical characterisation of the gaseous and liquid emiraments of subsurface drain systems. *Soil Se. Soc. America J.*, 1978, № 42, 5, P. 693–698.

References

1. Stratehiia zroshennia ta drenazhu v Ukraini na period do 2030 roku [Irrigation and drainage strategy in Ukraine until 2030.]: Skhvaleno rozporiadzhenniam Kabinetu Ministriv Ukrainy № 688-p. (2019, August 14). *Uriadovyi kurier*, 170. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/688-2019-%D1%80> [in Ukrainian]
2. Kostyakov, A.N. (1960). *Osnovy melioratsiy [Basics of reclamation]: 6-e izd., pererab. i dop.* Moskva : Selhozizd. [in Russian]
3. Averyanov, S.F. (1978). *Borba s zasoleniem oroshaemykh zemel [Combating salinization of irrigated lands]*. Moskva : Kolos. [in Russian]
4. Oleynik, A.Ya., Nosikovskiy, V.P., & Shapran, V.Ya. (1975). *Metodyi rascheta meliorativnogo drenazha v slozhnykh gidrogeologicheskikh usloviy: posobie k raschetam [Methods for calculating reclamation drainage in difficult hydrogeological conditions: manual for calculations]*. Kiev. [in Russian]
5. Kats, D.M. (1976). *Vliyanie orosheniya na gruntovyye vody [Impact of irrigation on groundwater]*. Moskva : Kolos. [in Russian]
6. Oleynik, A.Ya. (1984). *Geogidrodinamika drenazha [Drainage geohydrodynamics]*. Kiev : Naukova dumka. [in Russian]
7. Polyakov, V.L. (2018). *Raschet neustanovivshegosya deystviya meliorativnogo drenazha s uglublennym uchetom vliyaniya zony aeratsii i infiltratsii [Calculation of the unsteady action of ameliorative drainage with in-depth consideration of the influence of the zone of aeration and infiltration]*. *Gidrodinamika i akustika*, Vol. 1(91), 1, 53–69. [in Russian]
8. Dotsenko, V.I., Kovalenko, V.V., Rudakov, L.M., & Tkachuk, T.I. (2018). *Rozrakhunok i proektuvannya drenazhu na zroshuvalnykh systemakh: navch. posib. [Calculation and design of drainage on irrigation systems: textbook. way]*. Dnipro : DDAEU. [in Ukrainian]
9. Tupitsin, B.A., Morozov, V.V., Kolesnikov, V.V., & Asatryan, V.T. (1978). *Prichiny i usloviya formirovaniya drenazhnogo stoka na oroshaemykh zemlyakh yuga Ukrainy [Reasons and conditions for the formation of drainage flow on irrigated lands in the south of Ukraine]*. *Sovershenstvovaniya vodohozyaystvennogo vodospobzheniya, gidrotehnicheskikh sooruzheniy i gidravlicheskikh raschetov meliorativnykh sistem*. *Tr. Kishinevskogo s.-h. instituta*, 119–124. [in Russian]
10. Kozlenko, Ye.V., Morozov, O.V., & Morozov, V.V. (2020). *Inhuletska zroshuvalna systema: stan, problemy ta perspektyvy rozvytku : monohrafiia [Ingulets irrigation system: state, problems and prospects of development : monograph]*. Kherson : Ailant. [in Ukrainian]
11. Savchuk, D., Shevchenko, A., Babitska, O., Kostykovych, I., Kharlamov, O., & Zemlianska, D. (2017). *Osoblyvosti vidnovlennia drenazhnykh system [Features of restoration of drainage systems]*. *Upravlinnia vodnymy resursamy v umovakh zmin klimatu : Vseukr. nauk.-prakt. konf. Kyiv*, 240–241. [in Ukrainian]
12. Savchuk, D.P., Kharlamov, O.I., & Kotykovych, I.V. (2019). *Horyzontalni drenazh na foni zroshennia doshchuvальноiu mashynoiu “Frehat” [Horizontal drainage on the background of irrigation by sprinkler «Frigate»]*. *Vodne hospodarstvo Ukrainy*, 1–2, 12–18. [in Ukrainian]
13. Duyunov, I.K. (1978). *Melioratsiya zemel v usloviyakh napornogo pitaniya gruntovykh vod [Land reclamation in conditions of pressurized groundwater supply]*. Moskva : Kolos. [in Russian]
14. Kovda, V.A. (1981). *Pochvennyi pokrov, ego uluchshenie, ispolzovanie i ohrana [Soil cover, its improvement, use and protection]*. Moskva : Nauka. [in Russian]
15. Morozov, V.V. (2007). *Landshaftni melioratsii: navch. posib. [Landscape reclamation : textbook. way]*. Kherson : Vyd-vo KhDU. [in Ukrainian]
16. Dudchenko, V.V., Kornberher, V.H., Morozov, V.V., Morozov, O.V., & Dudchenko, K.V. (2016). *Rysovi zroshuvalni systemy: vykorystannia drenazhno-skydnykh vod : monohrafiia [Rice irrigation systems: the use of drainage and wastewater : monograph]*. Kherson : FOP Hrin D.S. [in Ukrainian]
17. Hoffman, G. et al. (1977). *Minimising salt in drain water by irrigation manadgement – Agricultural [Minimising salt in drain water by irrigation manadgement – Agricultural]*. *Water Management*, 3, 233–252. [in English]
18. Meek, B. (1978). *Chemical characterisation of the gaseous and liquid emiraments of subsurface drain systems [Chemical characterisation of the gaseous and liquid emiraments of subsurface drain systems]*. *Soil Sc. Soc. America J.* 42, 5, 693–698. [in English]

В.В. Морозов, А.В. Морозов, Е.В. Козленко
Гидродинамическая модель формирования стока
горизонтального дренажа в условиях бессточных
и слабодренированных орошаемых земель сухостепной зоны Украины

Аннотация. В статье приведены результаты исследований, на основе которых получена гидродинамическая модель формирования дренажного стока закрытого горизонтального дренажа на бессточных и слабодренированных орошаемых землях в сухостепной зоне Украины. Актуальность исследований заключается в их необходимости при проектировании систем горизонтального дренажа, определении оптимальных междренних расстояний, режимов функционирования и оценки эффективности дренажа при его эксплуатации в условиях орошения современной дождевальной техникой из закрытой внутрихозяйственной сети. Цель исследования – разработка обобщенной гидродинамической модели формирования стока закрытого горизонтального дренажа на фоне орошения из закрытой внутрихозяйственной сети на бессточных и слабодренированных землях, которыми характеризуются водораздельные равнины и приморские низменности сухостепной зоны Украины. Задачи исследования: определение основных условий и факторов формирования стока горизонтального дренажа; определение структуры притока грунтовых вод к дрене при оптимальных междренних расстояниях в условиях закрытой внутрихозяйственной сети; определение перспектив и направлений дальнейших исследований. Методы и методика исследования: многолетние (1975–2020 гг.) полевые опыты на дренажных участках с различными междренними расстояниями в типичных гидрогеологических условиях для водораздельных массивов и приморских низменностей; водобалансовые исследования; теоретические методы исследования (анализ и синтез, сравнение, обобщение, районирование) для определения структуры притока грунтовых вод к дрене применен метод электро-гидродинамических аналогий на лабораторном интеграторе ЭГДА 9/60. В результате исследования установлено, что в условиях закрытой водохозяйственной сети возможно увеличение междренних расстояний от 120–220 м до 240–400 м. При всех изучаемых природно-технических условиях бессточных и слабодренированных водораздельных равнин и приморских низменностей основными источниками, формирующими режим грунтовых вод и дренажного стока, являются атмосферные осадки 420 мм или 55,0% приходной части водного баланса, оросительная вода – 340 мм или 45,0% приходной части, в том числе 266 мм или 35,0% от поливов и 75 мм или 10,0% от фильтрации из каналов. Анализ гидродинамической модели формирования дренажного стока показывает, что при дренажных расстояниях 240–400 м приток из зоны выше дна дрены составляет 2,6–4,8% от общего притока в дрены. Восходящий поток под дном дрены попадает в нее под средним углом 60° и составляет при всех изучаемых вариантах 95,2–97,2% от общего притока. При увеличении расстояния между дренами от 240 до 300–400 м горизонтальный приток из зоны ниже дна дрены уменьшается при соответствующем увеличении восходящего потока под дном дрены. Средняя ширина восходящего потока в дрены на грани активной зоны грунтовых вод (9,0–10,0 м ниже дрен) равна 13,0–20,0 м. Полученная модель дополняет существующую теоретико-методическую базу знаний для проектирования горизонтального дренажа и необходима в перспективных исследованиях по формированию экспертных систем для оптимизации параметров и режимов функционирования орошения и дренажа в условиях современной широкозахватной дождевальной техники с поливом из закрытой внутрихозяйственной сети.

Ключевые слова: орошение, дренаж горизонтальный, формирование дренажного стока, гидродинамическая модель, сухостепная зона

V.V. Morozov, O.V. Morozov, Y.V. Kozlenko

Hydrodynamic model of the formation of horizontal drainage runoff on drainless and slightly drained irrigated lands in the dry steppe zone of Ukraine

Abstract. The article presents the results of the research, which are the basis of making a hydrodynamic model of the formation of drainage runoff of closed horizontal drainage on drainless and slightly drained irrigated lands in the dry steppe zone of Ukraine. The relevance of the research is in their need when designing the systems of horizontal drainage, determining drain spacing, modes of operation and the evaluation of drainage efficiency during its operation when irrigating with the use of modern sprinklers from a closed farm network. The objective of the research is to develop a generalized hydrodynamic model of formation of closed horizontal drainage runoff when irrigating from a closed farm network on drainless and slightly drained lands, which are typical for the watershed plains and coastal lowlands of the dry steppe zone of Ukraine. The task of the research to determine the basic conditions and factors of formation of horizontal drainage runoff, to specify the structure of groundwater inflow to the drains when having optimal drain spacing in the closed farm network and to define the prospects and areas of further research. Research methods and techniques: long-term (1975–2020) field experiments on drained areas with different drain spacing in typical hydrogeological conditions for watersheds and

coastal lowlands; water balance studies; theoretical research methods (analysis and synthesis, comparison, generalization, zoning); to determine the structure of groundwater inflow to the drains, the method of electrohydrodynamic analogies when using the laboratory integrator EGDA 9/60 was applied. As a result of the research it was determined that in the conditions of a closed water farm network it is possible to increase drain spacing from 120–220 m to 240–400 m. When studying all the conditions of drainless and slightly drained watershed plains and coastal lowlands, the main sources forming the regime of groundwater and drainage runoff are the precipitation of 420 mm or 55.0% of water input, irrigation water – 340 mm or 45.0%, including 266 mm or 35.0% from irrigation and 75 mm or 10.0% from filtration from the canals. The analysis of the hydrodynamic model of drainage runoff formation shows that when having drain spacing as 240–400 m, the inflow from the zone located above the bottom of the drain is 2.6–4.8% of the total inflow to the drain. The ascending flow under the bottom of the drain enters it at an average angle of 60° and in all variants of drain spacing is 95.2–97.2% of the total inflow. When drain spacing increases from 240 to 300–400 m, the horizontal inflow from the area located below the bottom of the drain decreases with a corresponding increase in the ascending flow under the bottom of the drain. The average width of the ascending flow to the drain at the edge of the active zone of groundwater (9.0–10.0 m below the drain) is 13.0–20.0 m. The resulting model complements the existing theoretical and methodological knowledge base for designing horizontal drainage and is necessary in perspective researches on the formation of expert systems for optimization of the parameters and modes of irrigation and drainage functioning when applying modern broadcast sprinkler equipment irrigating from the closed farm network.

Key words: irrigation, horizontal drainage, drainage runoff formation, hydrodynamic model, dry steppe zone