

[https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11\(21\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11(21)-12)

УДК 532.5:631.62

**РОЗРАХУНОК ГОРИЗОНТАЛЬНИХ РОЗПОДІЛЬЧИХ
ДРЕНАЖНИХ ТРУБОПРОВОДІВ, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ ЗА
НАЯВНОСТІ ПОХИЛУ РІВНЯ ҐРУНТОВИХ ВОД**

**CALCULATION OF HORIZONTAL DISTRIBUTION DRAINAGE
PIPELINES OPERATING IN THE PRESENCE OF GROUNDWATER
LEVEL SLOPE**

**Кравчук А.М., д.т.н., проф., Кочетов Г.М., д.т.н., проф.,
Кравчук О.А., к.т.н., доц., Самченко Д.М., к.т.н., ст. досл. (Київський
національний університет будівництва і архітектури)**

**Kravchuk A.M., Doctor of Engineering, Professor, Kochetov G.M.,
Doctor of Engineering, Professor, Kravchuk O.A., Ph.D. in Engineering,
Associate Professor, Samchenko D.M., Ph.D. in Engineering, Senior
Researcher (Kyiv National University of Construction and Architecture)**

На основі аналізу системи диференційних рівнянь, які описують рух рідини в горизонтальних розподільчих дренажних трубопроводах, що працюють при наявності похилу рівня ґрунтових вод, запропоновані досить прості та зручні для застосування аналітичні залежності для розрахунку основних гідравлічних і конструктивних характеристик таких труб. Досліджено, як похил рівня ґрунтових вод впливає на розрахункові характеристики розподільчих дренажних трубопроводів меліоративних систем.

The development of a reliable methodology for calculating drainage pipelines in reclamation systems is crucial for enhancing agricultural production efficiency and optimizing the use of water and land resources. The presented materials are based on the results of personal analytical studies of the fundamental mathematical dependencies describing the flow of pressurized fluid in horizontal distribution drainage pipelines operating in the presence of a slope in the groundwater level.

A system of two differential equations is considered, describing the fluid motion in a drainage pipeline with variable flow rate and the conditions of liquid entry from the surrounding soil through the walls of the pipe in filtration mode. The studied pipeline is laid in the presence of a slope in the groundwater level. By introducing new variables, the original system and its solution are presented in a dimensionless form. In this context, the solution of the system depends on three main factors: the resistance factor of the distribution drainage pipeline (ζ_1); the generalized parameter (A), which comprehensively incorporates the structural and filtering characteristics of the flow; and the slope of the

groundwater level (I). The analysis utilizes the concept of an infinitely long drainage pipeline operating in the presence of a slope in the groundwater level, or equivalently, an inclined pipeline with an infinitely permeable side surface. Relatively simple and user-friendly analytical dependencies were derived based on the conducted analysis, enabling the calculation of flow rate variations and pressure drop along the length.

Corresponding graphical dependencies were constructed to simplify the calculations, demonstrating that the geometric slope of the groundwater level, along with the resistance factor and the generalized parameter, significantly influence the calculated parameters of such pipelines.

Ключові слова: розподільчий дренажний трубопровід, гідравлічний коефіцієнт тертя, коефіцієнт фільтрації, фільтраційний опір, змінна витрата рідини.

Keywords: distribution perforated pipeline, hydraulic friction factor, hydraulic conductivity, filtration resistance, variable fluid flow.

Вступ. У сучасних умовах раціональне використання природних ресурсів та збереження екологічної рівноваги вимагає особливої уваги. Зокрема, для підвищення врожайності сільськогосподарських культур та підтримання стійкого вологісного режиму ґрунтів ключову роль відіграють меліоративні системи, головним елементом яких є дренажні трубопроводи [1-3]. При проектуванні даних трубопроводів постає проблема їх надійного розрахунку з урахуванням різноманітних факторів. Зокрема, при розрахунках слід враховувати похил рівня ґрунтових вод (РГВ), що часто має місце на практиці.

Аналіз останніх досліджень. Розробкою надійної методики інженерного розрахунку напірних розподільчих дренажних трубопроводів при різних умовах експлуатації займались досить багато вітчизняних та іноземних дослідників [4-8]. При аналізі роботи таких трубопроводів зазвичай використовувались рівняння руху рідини зі змінною витратою [9]. Отримані на їх основі розрахункові залежності з тим чи іншим ступенем точності описують розглядуваний процес. Однак більшість авторів розглядали варіант горизонтальної прокладки дренажних труб, а також нехтували впливом похилу рівня РГВ на параметри потоку в трубі, що не завжди відповідає реальним умовам.

Метою роботи є розробка методики інженерного розрахунку горизонтальних розподільчих напірних дренажних трубопроводів, які працюють за наявності похилу РГВ. Для досягнення поставленої мети застосовувались методи математичного аналізу приведених до безрозмірного вигляду вихідних диференціальних рівнянь, які описують рух рідини зі змінною витратою в даному випадку.

Результати досліджень. Особливістю потоку рідини в напірних розподільчих дренажних трубопроводах є те, що на параметри витікання впливає як конструкція самих дренажних труб, так і фільтраційні характеристики навколишнього ґрунту, рівень ґрунтових вод, відстань між дренами. Виділити окремо вплив кожного з названих параметрів на інтенсивність розподілу рідини за довжиною дрени складно. Тому, зазвичай, їх враховують комплексно введенням спеціального фільтраційного опору системи «дрена–ґрунт» $\overline{\Phi}$. В інженерних розрахунках цей опір приймається постійним і рівним його осередненому для даних умов значенню. Гідравлічний коефіцієнт тертя розподільчого дренажного трубопроводу λ_p також вважається постійним вздовж шляху, але не рівним його значенню для даного трубопроводу при рівномірному русі рідини λ_0 .

Залежно від рельєфу місцевості горизонтальні розподільчі дренажні трубопроводи можуть працювати як з прямим, так і зі зворотним похилом РГВ. Під прямим похилом РГВ ($I > 0$) будемо розуміти випадок, коли його рівень знижується за довжиною від початкового до кінцевого перерізу труби. Зворотним похилом ($I < 0$) вважається варіант, коли рівень РГВ підвищується уздовж труби.

У представленій статті розглядається варіант роботи горизонтального напірного розподільчого трубопроводу, який працює за наявності прямого похилу поверхні РГВ (рис. 1).

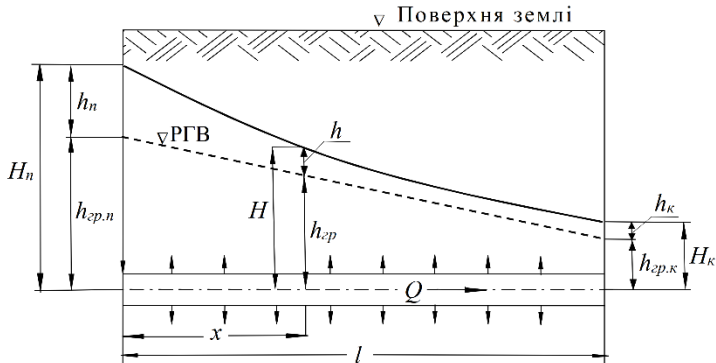


Рисунок 1 – Схема роботи горизонтального розподільчого дренажного трубопроводу за наявності прямого похилу поверхні РГВ

Як відомо, рух рідини в даному випадку описується системою диференціальних рівнянь, яка складається з рівняння гідравліки змінної маси (1) і модифікованого рівняння фільтрації (2) [10]:

$$\frac{dH}{dx} + \frac{2}{g} V \frac{dV}{dx} + \frac{\lambda_p}{2gD} V^2 - I = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d(V\Omega)}{dx} = -k_\phi \frac{h}{\Phi}, \quad (2)$$

де $H = h + h_{zp}$ – змінний за довжиною повний напір в дрени; h_{zp} – відстань від осі перерізу труби до поверхні рівня ґрунтових вод; $h = H - h_{zp}$ – змінний за довжиною напір, під дією якого відбувається витікання рідини з труби в навколишнє середовище; $\frac{h_{zp.n} - h_{zp.k}}{l} = I$ – геометричний похил рівня

поверхні ґрунтових вод (РГВ); $H = h + h_{zp.n} - \frac{h_{zp.n} - h_{zp.k}}{l} x = h + h_{zp.n} - Ix$;

$dH = dh - I dx$; $h_{zp} = h_{zp.n} - Ix$; Q , V , D , Ω – відповідно, витрата, середня швидкість, діаметр і площа живого перерізу потоку на відстані x від початку трубопроводу; Φ – фільтраційний опір дрени (його визначення представляє окрему фільтраційну задачу); k_ϕ – коефіцієнт фільтрації ґрунту навколо труби; λ_p – гідравлічний коефіцієнт тертя розподільчого дренажного трубопроводу [11]; g – прискорення вільного падіння.

Використавши наведені вище співвідношення, а також ввівши нові змінні

$$\bar{V} = \frac{V}{\sqrt{gh_n}}, \quad \bar{x} = \frac{k_\phi x}{\Omega \Phi} \sqrt{\frac{h_n}{g}}, \quad \bar{h} = \frac{h}{h_n}, \quad (3)$$

вихідна система рівнянь зводиться до безрозмірного вигляду:

$$\frac{d\bar{h}}{d\bar{x}} + 2\bar{V} \frac{d\bar{V}}{d\bar{x}} + \zeta_{lp} A \bar{V}^2 - B = 0 \quad (4)$$

$$\frac{d\bar{V}}{d\bar{x}} = -\bar{h}, \quad (5)$$

де $\zeta_{lp} = \lambda_p \frac{l}{D}$ – коефіцієнт опору розподільчого дренажного трубопроводу

[12]; $A = \frac{1}{2\bar{x}_k} = \frac{\Omega \Phi}{2k_\phi l} \sqrt{\frac{g}{h_n}}$ – узагальнений параметр розподільчої дрени,

який враховує її конструктивні і фільтраційні характеристики; $B = \frac{2\pi A}{h_n}$ –

параметр, який враховує вплив похилу поверхні ґрунтових вод на характеристики потоку в дрени.

Другий член рівняння (4) описує втрати напору, які пов'язані з ефектом від'єднання рідини, третій – втрати на гідравлічне тертя за довжиною, четвертий – вплив похилу РГВ.

У дренажних зволожуючих системах трубопроводу, як правило, мають відносно велику довжину. Тому впливом другого члена в рівнянні (4) зазвичай нехтують без суттєвої похибки [9], після цього отримаємо:

$$\frac{dh}{dx} = \zeta_{lp} A \bar{V}^2 - B. \quad (6)$$

Детальний розв'язок рівняння (6) наведено в роботі [13].

У результаті здійсненого аналізу та введення поняття умовного розподільчого дренажного трубопроводу нескінченної довжини ($l \rightarrow \infty$, $\zeta_{lp} \rightarrow \infty$), відносна швидкість у його початковому перерізі $\bar{V}_{n,\infty,l}$ рекомендується визначати з кубічного рівняння виду:

$$\frac{2\zeta_{lp} A}{3} \bar{V}_{n,\infty,l}^3 - 2B \bar{V}_{n,\infty,l} = 1. \quad (7)$$

При $B = 0$ дане рівняння переходить у залежність, що описує роботу горизонтального нескінченно довгого розподільчого трубопроводу, який працює при горизонтальному РГВ і буде мати відносну витрату в початковому перерізі $\bar{V}_{n,\infty} = \sqrt[3]{2\zeta_{lp} A/3}$.

Для подальшого аналізу введемо до розгляду поняття фіктивного горизонтального розподільчого дренажного трубопроводу нескінченної довжини, який працює при горизонтальному рівні ґрунтових вод ($I = 0$, $B = 0$), з характеристиками, що забезпечують в його початковому перерізі таку ж відносну швидкість (витрату), як і у розглядуваному трубопроводі, який працює за наявності похилу РГВ. Тобто, для них справедливе співвідношення:

$$\bar{V}_{n,\infty,l} = \bar{V}_{\phi,n,\infty} = \sqrt[3]{\frac{2\zeta_{lp} A \phi}{3}}. \quad (8)$$

Із залежності (8) можна знайти значення фіктивного узагальненого параметра:

$$A_{\phi} = \frac{3}{2\zeta_{I_p} \bar{V}_{\phi.n.\infty}^3}. \quad (9)$$

Залежність (9) характеризує співвідношення між основними конструктивними характеристиками фіктивного нескінченно довгого горизонтального трубопроводу.

Як показано в роботі [13], для фіктивного розподільчого горизонтального дренажного трубопроводу нескінченної довжини залежність між діючим напором і відносною довжиною має вигляд:

$$\bar{h}_{\phi} = \frac{1}{\left(1 - \frac{\bar{x}_{\phi}}{2\bar{V}_{\phi.n.\infty}}\right)^3}. \quad (10)$$

Для визначення співвідношень між \bar{x}_I і \bar{x}_{ϕ} , при яких відносні швидкості і напори в перерізах реального і фіктивного трубопроводів будуть рівні, тобто буде виконуватись умова:

$$\bar{V}_I = \bar{V}_{\phi}; \bar{h}_I = \bar{h}_{\phi}, \quad (11)$$

використаємо залежність (10), з якої після нескладних перетворень, отримаємо:

$$\bar{x}_{\phi} = 2\bar{V}_{\phi.n.\infty} \left(\frac{1}{\sqrt[3]{\bar{h}_I}} - 1 \right). \quad (12)$$

Вираз (12) дозволяє визначити значення відносної координати фіктивного і реального трубопроводів залежно від величин відповідних відносних напорів або швидкостей.

Висновки. У роботі на основі аналізу диференційних рівнянь, які описують рух рідини в розподільчих напірних горизонтальних дренажних трубопроводах, які працюють за наявності похилу рівня ґрунтових вод (I), запропоновано відносно прості аналітичні залежності для їх розрахунку. При проведенні аналізу введено поняття нескінченно довгого горизонтального дренажного трубопроводу або трубопроводу з нескінченною величиною просякнення бічної поверхні стінок труби. Приведені формули рекомендуються для застосування у широкому діапазоні зміни параметрів дренажних труб. Для подальшого розвитку даного напрямку досліджень вважаємо за необхідне більш детальне вивчення внутрішньої гідродинаміки потоку рідин у розподільчих дренажних трубопроводах.

References

1. Karadavut S., Erdogan S., Dayan V. (2023). Investigation of agricultural sustainability with irrigation and economic factors. *Black Sea Journal of Agriculture*. 2023. Vol. 6, No 4. P. 394–401. <https://doi.org/10.47115/bsagriculture.1300422>
2. Cvejić R., Pintar M., Zupanc V. Advancing irrigation development in the European Union. *Irrigation and Drainage*. 2021. Vol. 70, No 4. P. 887–899. <https://doi.org/10.1002/ird.2585>
3. Rosa L. Adapting agriculture to climate change via sustainable irrigation: biophysical potentials and feedbacks. *Environmental Research Letters*. 2022. Vol. 17, No 6, 063008. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ac7408>
4. Oyarce P., Gurovich L., Duarte V. Experimental evaluation of agricultural drains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2017. Vol. 143 No 4. 04016082. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.000113](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.000113)
5. Singh A. Irrigation planning and management through optimization modelling. *Water Resources Management*. 2014. Vol. 28. P. 1–14 <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0469-y>
6. Łabędzki L., Kaca E., Brandyk A. Irrigation and drainage in Polish agriculture: state, problems and needs. *Quality of Water Resources in Poland*. 2021. P. 91–118. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64892-3_5
7. Cherniuk V., Hnativ R., Kravchuk O., Orel V., Bihun I., Cherniuk M. The problem of hydraulic calculation of pressure distribution pipelines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 6, No 7 (114). P. 93–103. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.246852>
8. Kozishkurt S. M., Turcheniuk V. O. Metodolohichni ta ekolohichni aspekty udoskonalennia rozrakhunku vodnykh rezhymiv silskohospodarskykh kultur Visnyk NUVHP. Seria «Tekhnichni nauky». 2018. T. 3, № 87. S. 19–27. <https://doi.org/10.31713/vt420181>
9. Kravchuk O. A. Do hidravlichnoho rozrakhunku napirnykh drenazhnykh truboprovodiv, yaki pratsuiut v rezhymi rozdachi. *Komunalne gospodarstvo mist*. 2021. T. 3, № 163. C. 68–74. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-3-163-68-74>
10. Kravchuk A.M., Kravchuk O.A. Vyznachennia kharakterystyk rozpodilchykh drenazhnykh truboprovodiv pry propusku tranzytnoi vytraty. *Naukovyi visnyk budivnytstva*. 2021. T. 105, № 3. S. 123–129. <https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/488>
11. Kravchuk A., Cherniuk V., Kravchuk O., Airapetian, T. Assessing the value of the hydraulic friction factor in pipelines working with a flow connection along the path. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 5, No 7 (119). P. 61–67. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265670>
12. Kravchuk A., Cherniuk V., Kochetov G., Kravchuk O., Airapetian, T. Determination of the particularities of the hydraulic friction factor variation of collecting drainage pipelines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 6, No 7 (126). P. 33–38. <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2023.292258>
13. Kravchuk A., Kravchuk O. Rozrakhunok rozpodilchykh drenazhnykh truboprovodiv, prokladenykh z pokhylom. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliky*. 2023. № 42. S. 35–41. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.42.35-41>

Література

1. Karadavut S., Erdogan S., Dayan V. (2023). Investigation of agricultural sustainability with irrigation and economic factors. *Black Sea Journal of Agriculture*. 2023. Vol. 6, No 4. P. 394–401. <https://doi.org/10.47115/bsagriculture.1300422>
2. Cvejić R., Pintar M., Zupanc V. Advancing irrigation development in the European Union. *Irrigation and Drainage*. 2021. Vol. 70, No 4. P. 887–899. <https://doi.org/10.1002/ird.2585>
3. Rosa L. Adapting agriculture to climate change via sustainable irrigation: biophysical potentials and feedbacks. *Environmental Research Letters*. 2022. Vol. 17, No 6, 063008. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ac7408>
4. Oyarce P., Gurovich L., Duarte V. Experimental evaluation of agricultural drains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2017. Vol. 143 No 4. 04016082. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.000113](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.000113)
5. Singh A. Irrigation planning and management through optimization modelling. *Water Resources Management*. 2014. Vol. 28. P. 1–14 <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0469-y>
6. Łabędzki L., Kaca E., Brandyk A. Irrigation and drainage in Polish agriculture: state, problems and needs. *Quality of Water Resources in Poland*. 2021. P. 91–118. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64892-3_5
7. Cherniuk V., Hnativ R., Kravchuk O., Orel V., Bihun I., Cherniuk M. The problem of hydraulic calculation of pressure distribution pipelines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 6, No 7 (114). P. 93–103. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.246852>
8. Козішкурт С. М., Турченко В. О. Методологічні та екологічні аспекти удосконалення розрахунку водних режимів сільськогосподарських культур *Вісник НУВГП. Серія «Технічні науки»*. 2018. Т. 3, № 87. С. 19–27. <https://doi.org/10.31713/vt420181>
9. Кравчук О. А. До гідралічного розрахунку напірних дренажних трубопроводів, які працюють в режимі роздачі. *Комунальне господарство міст*. 2021. Т. 3, № 163. С. 68–74. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-3-163-68-74>
10. Кравчук А.М., Кравчук О.А. Визначення характеристик розподільчих дренажних трубопроводів при пропуску транзитної витрати. *Науковий вісник будівництва*. 2021. Т. 105, № 3. С. 123–129. <https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/488>
11. Kravchuk A., Cherniuk V., Kravchuk O., Airapetian, T. Assessing the value of the hydraulic friction factor in pipelines working with a flow connection along the path. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 5, No 7 (119). P. 61–67. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265670>
12. Kravchuk A., Cherniuk V., Kochetov G., Kravchuk O., Airapetian, T. Determination of the particularities of the hydraulic friction factor variation of collecting drainage pipelines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 6, No 7 (126). P. 33–38. <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2023.292258>
13. Кравчук А., Кравчук О. Розрахунок розподільчих дренажних трубопроводів, прокладених з похилом. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки*. 2023. № 42. С. 35–41. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.42.35-41>