

О.А. Кравчук

Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

РОЗРАХУНОК НЕОБХІДНОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ ПЕРФОРАЦІЇ БІЧНОЇ ПОВЕРХНІ РОЗПОДІЛЬЧИХ ДРЕНАЖНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

В статті запропоновано методику розрахунку ступеня перфорації стінок напірного розподільчого дренажного трубопроводу, яка базується на основі існуючих математичних залежностей, що описують закономірності витікання рідини через отвори та щілини в бічних стінках у фільтраційному режимі. Показано, що ступінь перфорації залежить від конструктивних та фільтраційних характеристик навоколишнього ґрунту та матеріалу труб.

Ключові слова: розподільчий дренажний трубопровід, отвори і щілини перфорації; ступінь перфорації; коефіцієнт фільтрації; фільтраційний опір; змінна витрата рідини.

Постановка проблеми

Меліорація сільськогосподарських земель є важливим елементом аграрної інфраструктури, що забезпечує стабільне функціонування сільськогосподарських угідь, покращує їх водний режим та підвищує врожайність [1, 2]. Серед основних технічних засобів, які використовуються для поліпшення водообміну в ґрунтах, важливу роль відіграють дренажні системи двосторонньої дії. Одним із ключових компонентів таких систем є розподільчі дренажні трубопроводи. Вони призначені для рівномірного і контрольованого розподілу води за всією площею зрошуваної ділянки з метою підтримки оптимального вологісного режиму в ґрунті для росту рослин в умовах недостатнього природного зволоження [3].

Ефективність функціонування дренажних систем значною мірою залежить від правильного визначення їх конструктивних і фільтраційних характеристик, зокрема ступеня перфорації поверхні стінок труб. Перфорація призначена для пропуску води через стінки труб, що є критично важливим для забезпечення правильного режиму водообміну в ґрунті. Однак визначення оптимального ступеня перфорації дренажних трубопроводів є складним завданням. Невірно підібраний ступінь перфорації може призвести до неефективного розподілу води, забруднення трубопроводів, а також скорочення терміну їх експлуатації. У свою чергу, надмірна або недостатня перфорація може призвести до зниження продуктивності меліоративних систем і збільшення витрат на їх обслуговування та ремонт.

Тому проблема визначення необхідного ступеня перфорації поверхні стінок розподільчих дренажних трубопроводів є надзвичайно актуальною. Вона

вимагає наукового підходу для врахування всіх чинників, що впливають на ефективність роботи меліоративних систем, а також розробки методики оптимального проектування таких трубопроводів у контексті конкретних умов експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання оптимального проектування дренажних систем є актуальним у сучасній інженерії. Йому присвячено досить велику кількість ґрунтовних робіт закордонних та вітчизняних дослідників [4 - 6]. Останні дослідження в цій галузі зосереджені на підвищенні ефективності експлуатації меліоративних систем [7, 8] і на вдосконаленні параметрів дренажних трубопроводів для забезпечення стабільного водного режиму в ґрунтах [9, 10].

Проте, при описанні параметрів потоку рідини в досліджуваних трубах, майже всі автори використовували певні, не завжди достатньо обґрунтовані, припущення. Це пов'язано зі складністю розв'язання вихідної математичної задачі – диференціальних рівнянь, що описують рух рідини зі змінною витратою [11]. Зокрема, вважалось, що дренажні трубопроводи працюють з постійною витратою ($q=\text{const}$) [12], або витрата змінюється рівномірно за довжиною режимі ($q=dQ/dx=\text{const}$) [13]. Багато робіт були присвячені тільки гідравлічним аспектам, а фільтраційні характеристики системи могли зовсім не враховуватись або враховувались недостатньо [14].

На сьогоднішній день відсутні достатньо зручні для практичного використання розрахункові формули для розрахунку оптимального ступеня перфорації дренажних трубопроводів при різних умовах роботи. Тому питання визначення оптимального ступеня перфорації для різних експлуатаційних умов потребує подальших досліджень і розробки спеціалізованих рекомендацій

для практичного застосування, які будуть одночасно враховувати конструктивні характеристики трубопроводів та фільтраційні властивості ґрунтів.

Формулювання мети статті

Метою даної роботи є розробка ефективної методики розрахунку ступеня перфорації бічних стінок напірних розподільчих дренажних трубопроводів, що забезпечують підведення необхідної витрати води до зрошувального

майданчика, аналіз впливу фільтраційних та конструктивних властивостей бічної поверхні дрени і навколишнього ґрунту на функціонування досліджуваних систем.

Виклад основного матеріалу

Схема роботи розподільчого дренажного трубопроводу приведена на рис. 1.

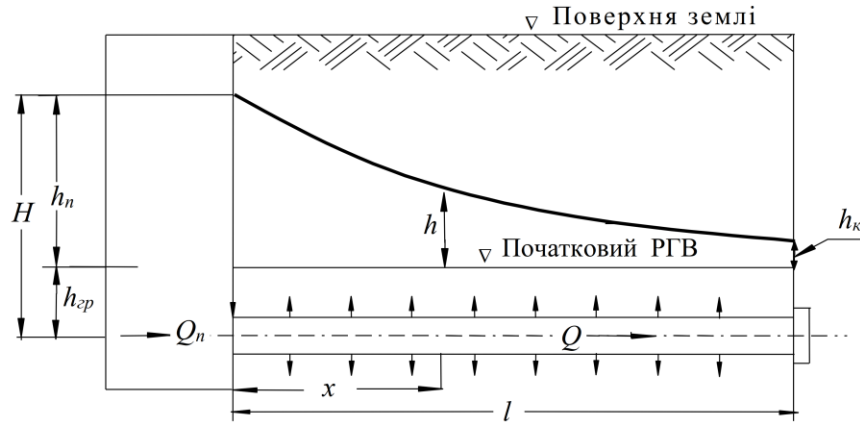


Рис. 1. Схема роботи горизонтального розподільчого дренажного трубопроводу

Як зазначено в ряді досліджень [15], витрата рідини, що витікає в навколишнє середовище через бічну поверхню одиниці довжини напірного трубопроводу, рівномірно перфорованого отворами, розраховується за залежністю:

$$q = \frac{dQ}{dx} = -\mu_p \alpha_n \sqrt{2gh}. \quad (1)$$

де Q – витрата води на відстані x від початку трубопроводу; μ_p – середній коефіцієнт витрати отворів перфорації розподільника; $\alpha_n = \frac{\sum \omega_o}{l}$ – площа отворів (щілин) перфорації на одиницю довжини трубопроводу; ω_o – площа перерізу одного отвору; g – прискорення вільного падіння; h – змінний за довжиною трубопроводу п'єзометричний напір, під дією якого відбувається витікання рідини з трубопроводу в навколишнє середовище.

Водночас, витрата води, що витікає в навколишній ґрунт з напірного дренажного трубопроводу під час його роботи в режимі зволоження, обчислюється за наступною залежністю [16]:

$$q = \frac{dQ}{dx} = -k_\phi \frac{h}{\bar{\Phi}}, \quad (2)$$

де k_ϕ – коефіцієнт фільтрації ґрунту навколо дренажної труби; $\bar{\Phi}$ – безрозмірний фільтраційний опір дрени (його визначення представляє окрему фільтраційну задачу [17]).

Якщо інтенсивність витікання рідини в обох випадках однакова, то можна записати наступне співвідношення:

$$\mu_p \alpha_n \sqrt{2gh} = k_\phi \frac{h}{\bar{\Phi}}. \quad (3)$$

Звідки безрозбірний фільтраційний опір розподільчого дренажного трубопроводу буде складати:

$$\bar{\Phi} = \frac{k_\phi \sqrt{h}}{\mu_p \alpha_n \sqrt{2g}}. \quad (4)$$

З формули (4) після нескладних перетворень можна отримати:

$$\bar{\Phi} = \frac{k_\phi \sqrt{h}}{\mu_p \pi D S \sqrt{2g}}, \quad (5)$$

де D – діаметр розподільчого трубопроводу; $S = \frac{\sum \omega_o}{\pi D l}$ – відношення сумарної площі отворів перфорації в дренажному трубопроводі до загальної площі бічної поверхні труби (при рівномірній перфорації стінок трубопроводу – те ж саме на одиниці довжини труби).

Прийнявши в середньому для всієї труби значення коефіцієнта витрати отворів перфорації $\mu_p = 0,62$ отримаємо:

$$\bar{\Phi} = 0,36 \frac{k_\phi}{DS} \sqrt{\frac{h}{g}}. \quad (6)$$

За допомогою формули (6) можна легко розрахувати величину відносної перфорації стінок дренажного трубопроводу, що забезпечить витікання рідини в навколишнє середовище:

$$S = 0,36 \frac{k_{\phi}}{D\Phi} \sqrt{\frac{h}{g}}. \quad (7)$$

Загалом в залежності від конкретних умов, при проектуванні розподільчих дренажних трубопроводів меліоративних систем, вирішуються різні задачі.

Як правило при проектуванні дренажних трубопроводів меліоративних систем є відомими наступні параметри: необхідна швидкість V_n (витрата Q_n) на початку труби; довжина трубопроводу l ; його діаметр D ; коефіцієнт фільтрації навколишнього ґрунту k_{ϕ} ; середній п'єзометричний напір за довжиною трубопроводу $h_{сер}$; фільтраційний опір розподільчої дрени $\bar{\Phi}$; гідравлічний коефіцієнт тертя λ_p . В такому випадку необхідний ступінь перфорації стінок трубопроводу рекомендується розраховувати за залежністю (7).

Раніше в роботі [18] було отримано, що відносну швидкість на початку розподільчого трубопроводу $\bar{V}_n$ в загальному випадку рекомендується розраховувати за формулою:

$$\bar{V}_n = \bar{V}_{n,\infty} \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{4A\bar{V}_{n,\infty}} \right)^2} \right]. \quad (8)$$

де $A = \frac{\Omega\bar{\Phi}}{2k_{\phi}l} \sqrt{\frac{g}{h_n}}$ – узагальнений параметр збірної дрени, який враховує її конструктивні і фільтраційні

характеристики; $\bar{V}_n = \frac{V_n}{\sqrt{gh_n}}$; $\bar{V}_{n,\infty} = 3 \sqrt{\frac{12k_{\phi}}{\lambda \pi D \Phi} \sqrt{\frac{h_n}{g}}}$ –

відносна швидкість на початку умовного нескінченно довгого розподільчого дренажного трубопроводу (відносна швидкість на початку розподільника, яка відповідає максимальній витраті, яку можна роздати через бічну поверхню нескінченно довгого дренажного трубопроводу такого ж діаметру).

У випадку, коли за результатами розрахунку необхідно визначити фільтраційний опір дрени $\bar{\Phi}$ при відомій величині відносної швидкості (витрати) в початковому перерізі реального трубопроводу $\bar{V}_n$, пропонується використовувати графік на рис. 2.

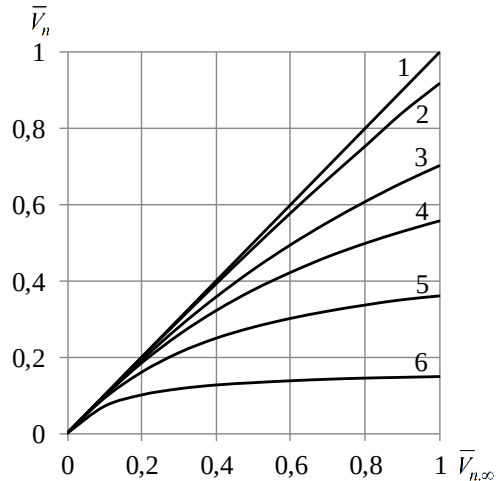


Рис. 2. Співвідношення між відносною швидкістю в початковому перерізі умовного нескінченно довгого $\bar{V}_{n,\infty}$ і реального розподільного трубопроводу $\bar{V}_n$:

1 – $A = 0$; 2 – $A = 0,1$; 3 – $A = 0,3$; 4 – $A = 0,5$;
5 – $A = 1,0$; 6 – $A = 3$

Представлений графік показує, що конкретним значенням $\bar{V}_n$ одночасно можуть відповідати декілька різних співвідношень між значеннями $\bar{V}_{n,\infty}$ і конструктивного параметра A . Тобто, задана витрата на початку розглядуваного трубопроводу може бути забезпечена при різних значеннях пари співвідношень між $\bar{V}_{n,\infty}$ і A . Обравши конкретні, найбільш реалістичні значення вказаних величин, за наведеною раніше схемою можна визначити інші необхідні характеристики розподільчого дренажного трубопроводу.

Прийнявши для трубопроводів з ефективними конструктивними характеристиками ($h_{сер} \approx h_n/2$), з (7) відносний ступінь перфорації бічних стінок трубопроводу рекомендується визначати за формулою:

$$S = 0,14 \frac{D}{Al}. \quad (9)$$

Сумарна площа отворів (щілин) у бічних стінках розподільчого дренажного трубопроводу буде складати (м²):

$$\sum \omega_o = S \cdot \pi \cdot D \cdot l = 0,14 \frac{\pi D^2}{A_p}. \quad (10)$$

Якщо задатись діаметром одного отвору d_o , можна визначити загальну кількість отворів на всій довжині трубопроводу за формулою:

$$N = 0,56 \frac{D^2}{d_o^2 A_p}. \quad (11)$$

Тоді, якщо прийняти перфорацію рівномірною вздовж шляху, кількість отворів на один погонний метр труби буде дорівнювати:

$$n = \frac{N}{l}. \quad (12)$$

Висновки

У представлений роботі запропоновано методику визначення необхідного ступеня перфорації поверхні стінок розподільчих дренажних трубопроводів, яка враховує вплив конструктивних характеристик трубопроводів та фільтраційних властивостей навколишнього ґрунту на ефективність їх роботи. Продемонстровано, що ступінь перфорації є важливим параметром при проектуванні меліоративних систем та залежить як від конструктивних, так і фільтраційних характеристик навколишнього ґрунту і матеріалу стінок дренажних трубопроводів.

Одержані результати можуть бути корисними для удосконалення методів проектування та забезпечення ефективної роботи дренажних систем у різних умовах. В подальшому, запропоновані підходи можуть бути використані для вдосконалення технічних нормативів і стандартів у галузі меліорації та водовідведення.

Література

1. Vlotman W. Modern land drainage: planning, design and management of agricultural drainage systems / W. Vlotman, L. Smedema, D. Rycroft. – London: CRC Press, 2020. – 502 p. <https://doi.org/10.1201/9781003025900>
2. Schultz B. Irrigation and drainage systems research and development in the 21st century / B. Schultz, D. De Wrachien // *Irrigation and Drainage*. – 2002. – Vol. 51, №4. – P. 311–327. <https://doi.org/10.1002/ird.67>
3. Castellano M. J. Sustainable intensification of agricultural drainage / M. J. Castellano, S. V. Archontoulis, M. J. Helmers, H. J. Poffenbarger, J. Six // *Nature Sustainability*, – 2019. – No. 2. – P. 914–921. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0393-0>
4. Rokochinskiy A. Forecasted estimation of the efficiency of agricultural drainage on drained lands / A. Rokochinskiy, P. Volk, O. Pinchuk, V. Turcheniuk, N. Frolenkova, I. Gerasimov // *Journal of Water and Land Development*, 2019. – No 40. – P. 149–153. <https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0016>
5. Oyarce P. Experimental evaluation of agricultural drains / P. Oyarce, L. Gurovich, V. Guarte // *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2017. – Vol. 143, No 4. – P. 143(4):04016082. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001134](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001134)
6. Кравчук А. Визначення характеру зміни діаметра розподільчого дренажного трубопроводу вздовж шляху / А. Кравчук, О. Кравчук, Р. Чабанюк, О. Кравчук // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*, 2024. – Вип. 46. – С. 14–19. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2024.46.14-19>
7. Ткачук М. М. Забезпечення ефективності водорегулювання на водогосподарських системах інноваційними конструкціями / М. М. Ткачук, В. О. Турченко, Л. А. Шинкарук, Л. Р. Ткачук // *Вісник НУВГП*, 2021. – Т. 4, № 96. – С. 106–116. <https://doi.org/10.31713/vt420219>
8. Вовк П. П. Комплекс заходів з підвищення ефективності функціонування рисових зрошувальних систем / П. П. Вовк, Н. В. Приходько, Д. М. Ричко Д. М. // *Вісник НУВГП*.

- Серія «Технічні науки», 2018. – Т. 4, № 84. – С. 3–21. <https://doi.org/10.31713/vt420181>
9. Playán E. Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity / E. Playán, L. Mateos. // *Agricultural Water Management*, 2006. – Vol. 80, No 1-3. – P. 100–116. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.007>
 10. Gurovich L. New approaches to agricultural land drainage: a review / L. Gurovich, P. Oyarce // *Irrigation & Drainage Systems Engineering*, 2015. – Vol. 4, No 135. – P. 2. <http://dx.doi.org/10.4172/2168-9768.1000135>
 11. Cherniuk V. The problem of hydraulic calculation of pressure distribution pipelines / V. Cherniuk, R. Hnativ, O. Kravchuk, V. Orel, I. Bihun, M. Cherniuk // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021. – Vol. 6, No 7 (114). – P. 93–103. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.246852>
 12. Clemo T. (2006). Flow in perforated pipes: a comparison of models and experiments / T. Clemo // *SPE Production & Operations*, 2006. Vol. 21, No 2. – P. 302–311. <https://doi.org/10.2118/89036-PA>
 13. Кравчук А. Проектування трубопроводів для рівномірного збору води вздовж шляху / А. Кравчук, Г. Кочетов, О. Кравчук // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*, 2020. – Вип. 33. – С. 34–40. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2020.33.34-40>
 14. Науменко І. І. Математичні моделі для гідравлічних розрахунків трубопроводів з дискретно зростаючими витратами / І. І. Науменко, В. А. Волощук // *Вісник РДТУ*, 2001. – Т. 1, № 8. С. 88–99.
 15. Кравчук А. М. Гідравліка напірних перфорованих трубопроводів очисних споруд систем водопостачання та водовідведення: монографія / А. М. Кравчук, Д. О. Чернишев, О. А. Кравчук. – Київ: КНУБА, 2021. – 204 с.
 16. Кравчук О. А. До гідравлічного розрахунку напірних дренажних трубопроводів, які працюють в режимі роздачі / О. А. Кравчук // *Комунальне господарство міст*, 2021. – Вип. 163. – С. 68–74. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-3-163-68-74>
 17. Олійник О. Я. Дренаж перезволожених ґрунтів / О. Я. Олійник, В. Л. Поляков. – Київ: Наукова думка, 1987. – 279 с.
 18. Kravchuk A. Calculation of effective parameters of distribution drainage pipelines / A. Kravchuk, O. Kravchuk, S. Velychko, T. Airapetian // *Proceedings of EcoComfort 2024. Lecture Notes in Civil Engineering*, 2024. – Vol. 604. – P. 331–340. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67576-8_29

Reference

1. Vlotman, W., Smedema, L., & Rycroft, D. (2020). *Modern land drainage: Planning, design and management of agricultural drainage systems*. London: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003025900>
2. Schultz, B., & De Wrachien, D. (2002). Irrigation and drainage systems research and development in the 21st century. *Irrigation and Drainage*, 51(4), 311–327. <https://doi.org/10.1002/ird.67>
3. Castellano, M. J., Archontoulis, S. V., Helmers, M. J., Poffenbarger, H. J. & Six, J. (2019). Sustainable intensification of agricultural drainage. *Nature Sustainability*, 2, 914–921. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0393-0>
4. Rokochinskiy, A., Volk, P., Pinchuk, O., Turcheniuk, V., Frolenkova, N., & Gerasimov, I. (2019). Forecasted estimation of the efficiency of agricultural drainage on drained lands.

Journal of Water and Land Development, (40), 149-153. <https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0016>

5. Oyarce, P., Gurovich, L. & Guarte, V. (2017). Experimental evaluation of agricultural drains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(4), 143(4):04016082. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001134](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001134)

6. Kravchuk, A., Kravchuk, O., Chabaniuk, R., & Kravchuk, O. (2024). Determination of the diameter variation peculiarities along the path of distribution drainage pipeline. *Problems of Water Supply, Sewerage and Hydraulic*, (46), 14-19. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2024.46.14-19>

7. Tkachuk, M. M., Turcheniuk, V. O., Shynkaruk, L. A., Tkachuk, L. R. (2021). Ensuring efficiency of water regulation on water management systems with innovative structures. *Bulletin National University of Water and Environmental Engineering*, 4(96), 106-116. <https://doi.org/10.31713/vt420219>

8. Turcheniuk, V. O., Rokochynskyi, A. M., Volk, P. P., Prykhodko, N. V., Rychko, D. M. (2018). Complex of measures to improve the efficiency of functioning of figured extractive systems. *Bulletin National University of Water and Environmental Engineering*, 4(84), 3-21. <https://doi.org/10.31713/vt420181>

9. Playán, E., & Mateos, L. (2006). Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. *Agricultural water management*, 80(1-3), 100-116. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.007>

10. Gurovich, L., & Oyarce, P. (2015). New approaches to agricultural land drainage: a review. *Irrigation & Drainage Systems Engineering*, 4(135), 2. <http://dx.doi.org/10.4172/2168-9768.1000135>

11. Cherniuk, V., Hnativ, R., Kravchuk, O., Orel, V., Bihun, I. & Cherniuk, M. (2021). The problem of hydraulic calculation of pressure distribution pipelines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(7(114), 93-103. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.246852>

12. Clemo, T. (2006). Flow in perforated pipes: a comparison of models and experiments. *SPE Production & Operations*, 21(2), 302-311. <https://doi.org/10.2118/89036-PA>

13. Kravchuk, A., Kochetov, G., & Kravchuk, O. (2020). Pipelines designing for steady water collection along the path. *Problems of Water Supply, Sewerage and Hydraulic*, (33), 34-40. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2020.33.34-40>

14. Naumenko, I. I. & Voloshchuk, V. A. (2001). Mathematical models for hydraulic calculations of pipelines with discretely increasing flows. *Bulletin of RDTU*, 1(8), 88-99.

15. Kravchuk, A. M., Chernyshev, D. O., & Kravchuk, O. A. (2021). *Hydraulics of pressure perforated pipelines of treatment facilities of water supply and water disposal systems: monograph*. Kyiv: KNUCA.

16. Kravchuk, O. (2021). To the hydraulic calculation of pressure drainage pipelines, operating in distribution regime. *Municipal Economy of Cities*, 3(163), 68-74. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-3-163-68-74>

17. Oleynik, A. Ya. & Polyakov V. L. (1987). *Drainage of wetlands*. Kyiv: Naukova dumka.

18. Kravchuk, A., Kravchuk, O., Velychko, S., Airapetian, T. (2024). Calculation of effective parameters of distribution drainage pipelines. *Proceedings of EcoComfort 2024. Lecture Notes in Civil Engineering*, 604, 331-340 https://doi.org/10.1007/978-3-031-67576-8_29

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В. П. Хоружий
Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна.

Автор: КРАВЧУК Олександр Андрійович
кандидат технічних наук, доцент кафедри водопостачання та водовідведення
Київський національний університет будівництва і архітектури
E-mail – kravchuk.oa2@knuba.edu.ua
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6578-8896>

CALCULATION OF THE REQUIRED PERFORATION INTENSITY FOR THE LATERAL SURFACE OF DISTRIBUTION DRAINAGE PIPELINES

O. Kravchuk

Kyiv National University of Construction and Architecture, Ukraine

This paper considers the operation features of a pressure distribution drainage pipeline, where the fluid leakage along the length occurs through holes and slots in the side walls in filtration mode. In this case, the filtration mode of fluid leakage from the pipeline is ensured by using various types of rolled filter material for wrapping the drain. At the same time, the fluid within the pipeline moves in a turbulent mode. Based on a comparison of the calculated dependencies used to describe the law of fluid leakage from pipelines in each case, namely, leakage from perforation holes and through the filter material, relatively simple and convenient calculation formulas are derived for determining the required degree of the side walls perforation of the drainage pipeline, ensuring the leakage of a given water flow from the distributor. The degree of perforation S is understood as the ratio of the area of the perforation holes (slots) in the side walls of the drainage pipeline to the total area of its side surface. The parameter A , which comprehensively takes into account the design and filtration characteristics of drainage pipelines, is used in the analysis of the operation of the considered pipes. Additionally, when determining the flow rate in the initial cross-section of the distribution pipeline, the concept of an infinitely long drainage pipeline, or equivalently, a pipeline with infinitely large penetration along its side wall surface, is introduced. Corresponding analytical dependencies and a graph are presented for determining the searched parameters. It is shown that the degree of perforation is influenced by both the structural characteristics of the pipeline itself and the filtration properties of the surrounding soil and the surface of the drainage pipes. Moreover, the proposed methodology for calculating the perforation intensity ensures an even placement of holes along the length of the distribution pipe.

Keywords: distribution drainage pipeline, perforation holes and slots, degree of perforation, hydraulic conductivity, filtration resistance, variable flow rate.