

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРУ ЗМІНИ ДІАМЕТРА РОЗПОДІЛЬЧОГО ДРЕНАЖНОГО ТРУБОПРОВОДУ ВЗДОВЖ ШЛЯХУ

Андрій Кравчук¹, Олександр Кравчук², Роман Чабанюк³, Ольга Кравчук⁴

^{1,2,3} Київський національний університет будівництва і архітектури
31, пр. Повітрофлотський, м. Київ, Україна, 03037

⁴ Національний транспортний університет
1, вул. М. Омеляновича-Павленка, м. Київ, Україна, 01010

¹ докт. техн. наук, kravchuk.am@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0001-8732-9244

² канд. техн. наук, kravchuk.oa2@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0001-6578-8896

³ chabaniuk_ra@knuba.edu.ua, orcid.org/0009-0000-6409-6660

⁴ olgakravchuk56@gmail.com, orcid.org/0000-0003-2616-5455

DOI: 10.32347/2524-0021.2024.46.14-19

Анотація. В даній роботі на основі проведеного аналізу системи диференційних рівнянь, що описують рух рідини зі змінною витратою в розподільчих напірних дренажних трубопроводах змінного (такого, що зменшується) за довжиною перерізу, розроблена методика розрахунку гідравлічних характеристик і конструктивних параметрів даних труб. В роботі розглянуто найбільш загальний випадок роботи розподільників при наявності над трубою горизонтального рівня ґрунтових вод. При аналізі вихідних рівнянь було розглянуто варіант роботи розподільчих трубопроводів, при якому всередині напірного каналу за всією його довжиною забезпечувалась постійна за величиною середня швидкість руху потоку рідини. Величина цієї швидкості залежить від гранулометричних особливостей навколишнього ґрунту, в якому прокладено трубопровід, і фільтраційних характеристик матеріалу бічних стінок трубопроводів. При дослідженні вихідних рівнянь і отриманні розрахункових залежностей було використано поняття умовного нескінченно довгого розподільчого трубопроводу або трубопроводу обмеженої довжини того, що має нескінченну просякненість поверхні бічних стінок. Головною особливістю якого є можливість прийняття рівним близьким до нуля напору в його кінцевому перерізі. Вказане припущення практично не впливає на отримані кінцеві результати. Аналіз представлено в безрозмірному вигляді. Отримані розрахункові формули досить прості і зручні у використанні. Для ілюстрації представлених залежностей в роботі приведені відповідні графіки.

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

ВСТУП

У сучасних умовах при експлуатації сільськогосподарських угідь зрошувальні системи займають важливе місце в підтриманні високих рівнів врожайності та ефективного використання водних ресурсів [1-3]. Одним із ключових елементів зрошувальних систем є розподільчі дренажні трубопроводи, які відіграють основну роль у забезпеченні подачі необхідних об'ємів води і підтримання

оптимального вологісного режиму в ґрунті для кожної сільськогосподарської ділянки.

На сьогоднішній день актуальним є питання вдосконалення конструкції та методики розрахунку таких трубопроводів [4-6]. Одним із варіантів вирішення цієї проблеми є застосування дренажних трубопроводів змінного діаметра вздовж шляху, оскільки ця обставина безпосередньо впливає на рівномірність та ефективність зрошення, а також на раціональне використання водних ресурсів.

Дослідженню роботи напірних розподільчих дренажних трубопроводів присвячено досить велику кількість робіт вітчизняних та іноземних дослідників [7-12]. Проте питання використання та розрахунку трубопроводів змінного діаметра вивчено не достатньо.

Детальне дослідження цієї проблеми дозволить розробити оптимальні рішення для будівництва та експлуатації меліоративних систем, забезпечити стійкість та надійність роботи даних систем в умовах постійної зміни ґрунтових умов.

МЕТА І МЕТОДИ

Метою даної роботи є розробка методики розрахунку конструктивних характеристик розподільчих напірних дренажних трубопроводів змінного (такого, що зменшується)

поперечного перерізу, які працюють при наявності горизонтального рівня ґрунтових вод (РГВ).

Для досягнення поставленої мети застосовувались методи математичного аналізу приведених до безрозмірного вигляду вихідних диференціальних рівнянь, які описують рух рідини зі змінною витратою вздовж шляху.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОЯСНЕННЯ

Для розглядуваного випадку роботи розподільчого дренажного трубопроводу зі змінною за довжиною (такою, що зменшується) площею поперечного перерізу схема роботи труб приведена на рис. 1.

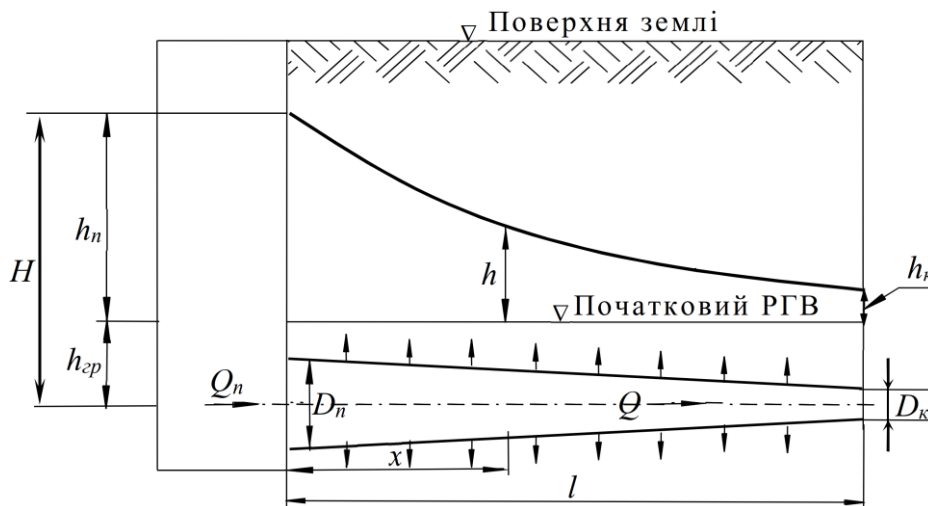


Рис. 1. Схема роботи розподільчого дренажного трубопроводу змінного діаметра
Fig. 1. Scheme of the variable-diameter distribution drainage pipeline operation

В принципі, можна задатися яким завгодно законом зміни площі перерізу труби за довжиною напірного розподільника.

Найбільш аргументованим, з нашої точки зору, буде зміна перерізу за залежністю, при якій буде забезпечуватись постійна, економічно найвигідніша, середня швидкість руху рідини вздовж каналу. Тобто, за довжиною труби повинна виконуватись умова $V = const$.

При великому фільтраційному опорі системи «дрена–ґрунт» $\bar{\Phi}$ за довжиною труби буде мати місце приблизно рівномірний відтік рідини. При малому – нерівномірний.

Спочатку розглянемо більш загальний випадок нерівномірної зміни шляхової витрати в розподільчому дренажному трубопроводі.

Як відомо, рух рідини в напірному розподільчому дренажному трубопроводі описується системою диференціальних рівнянь [13, 14], яка складається з рівняння гідравліки змінної маси (1) і рівняння нерозривності потоку, що враховує умови входу рідини в трубопровід (2):

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

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

де H – повний напір води в трубі; h_{zp} – глибина занурення осі труби від початкового рівня ґрунтових вод; $h=H-h_{zp}$ – змінний за довжиною напір, під дією якого відбувається витікання рідини з труби в навколишнє середовище; Q, V – відповідно, витрата і середня швидкість в перерізі потоку на відстані x від початку труби; D, Ω – змінні за довжиною діаметр і площа перерізу труби; $\bar{\Phi}$ – фільтраційний опір дрени; k_ϕ – коефіцієнт фільтрації ґрунту навколо труби; λ_p – гідравлічний коефіцієнт тертя розподільчого дренажного трубопроводу; g – прискорення вільного падіння.

За прийнятої умови ($\frac{dV}{dx} = 0$) другий і третій член в рівнянні (1) можна не враховувати.

З урахуванням цього рівняння (1) набуде вигляду:

$$\frac{dh}{dx} + \frac{\lambda_p V^2}{2gD} = 0. \quad (3)$$

Для подальшого аналізу введемо нові безрозмірні змінні:

$$\bar{x} = \frac{k_\phi x}{\Omega_n \bar{\Phi}} \sqrt{\frac{h_n}{g}}, \quad \bar{h} = \frac{h}{h_n}, \quad \bar{D} = \frac{D}{D_n}. \quad (4)$$

де h_n, D_n, Ω_n – відповідно напір, діаметр і площа перерізу труби в початковому перерізі.

Легко показати, що $d\Omega = d\left(\frac{\pi D^2}{4}\right) = \frac{\pi D_n^2}{2} \bar{D} d\bar{D}$. Позначимо

$$\bar{V} = \frac{V}{\sqrt{gh_n}} = const.$$

З прийнятими припущеннями, після підстановки нових змінних (4), вихідна система рівнянь (1), (2) легко зводиться до вигляду:

$$\frac{d\bar{h}}{d\bar{x}} = -\zeta_{l_{p,n}} \bar{A} \bar{V}^2 \frac{1}{\bar{D}}; \quad (5)$$

$$2\bar{V} \bar{D} \frac{d\bar{D}}{d\bar{x}} = -\bar{h}, \quad (6)$$

де $\zeta_{l_{p,n}} = \lambda_p \frac{l}{D_n}$ – коефіцієнт опору розподільника, підрахований за величиною діаметра в його початковому перерізі;

$A = \frac{1}{2\bar{x}_k} = \frac{\Omega_n \bar{\Phi}}{2k_\phi l} \sqrt{\frac{g}{h_n}}$ – узагальнений параметр розподільчої дрени, який враховує її конструктивні і фільтраційні характеристики [15].

метр розподільчої дрени, який враховує її конструктивні і фільтраційні характеристики [15].

З (6) отримаємо:

$$\bar{D} = -\frac{\bar{h}}{2\bar{V} \frac{d\bar{D}}{d\bar{x}}}. \quad (7)$$

Підстановка (7) в залежність (5) і розподіл змінних, після нескладних перетворень, призводить до рівняння:

$$\bar{h} d\bar{h} = 2\zeta_{l_{p,n}} \bar{A} \bar{V}^3 d\bar{D}. \quad (8)$$

Його розв'язок буде [16]:

$$\frac{\bar{h}^2}{2} = 2\zeta_{l_{p,n}} \bar{A} \bar{V}^3 \bar{D} + C. \quad (9)$$

Константу інтегрування визначаємо з граничних умов: в кінці трубопроводу

$$\bar{h} = \bar{h}_k; \quad \bar{D}_k = 0, \quad \text{тоді } C = \frac{\bar{h}_k^2}{2}.$$

Остаточна залежність відносного діаметра труби від діючого відносного напору набуде вигляду:

$$\bar{h}^2 - \bar{h}_k^2 = 4\zeta_{l_{p,n}} \bar{A} \bar{V}^3 \bar{D}. \quad (10)$$

В початковому перерізі будемо мати $\bar{D}_n = 1$ і $\bar{h}_n = 1$, отже:

$$1 - \bar{h}_k^2 = 4\zeta_{l_{p,n}} \bar{A} \bar{V}^3. \quad (11)$$

Для нескінченно довгого трубопроводу $\bar{h}_k \rightarrow 0$, тоді:

$$1 = 4\zeta_{l_{p,n}} \bar{A} \bar{V}^3. \quad (12)$$

Останні вирази встановлюють граничні співвідношення між конструктивними і фільтраційними характеристиками нескінченно довгого розподільчого дренажного трубопроводу.

Константа інтегрування в розв'язку (9) для початкового перерізу трубопроводу, складе:

$$C = \frac{1}{2} - 2\zeta_{l_{p,n}} A \bar{V}^3. \quad (13)$$

Її підстановка в (9) дає:

$$1 - \bar{h}^2 = 4\zeta_{l_{p,n}} A \bar{V}^3 (1 - \bar{D}). \quad (14)$$

Або, з урахуванням співвідношення (12):

$$\bar{h} = \sqrt{\bar{D}}. \quad (15)$$

Продиференціювавши (15) і розділивши обидві частини отриманого рівняння на $d\bar{x}$, маємо:

$$\frac{d\bar{h}}{d\bar{x}} = \frac{1}{2\sqrt{\bar{D}}} \frac{d\bar{D}}{d\bar{x}}. \quad (16)$$

Підставивши в ліву частину залежності (16) його значення з (15), отримаємо:

$$-\zeta_{l_{p,n}} A \bar{V}^2 \frac{1}{\bar{D}} = \frac{1}{2\sqrt{\bar{D}}} \frac{d\bar{D}}{d\bar{x}}. \quad (17)$$

Провівши скорочення і розділивши змінні, будемо мати:

$$-2\zeta_{l_{p,n}} A \bar{V}^2 d\bar{x} = \sqrt{\bar{D}} d\bar{D}. \quad (18)$$

Інтегруємо (18) [16]:

$$-2\zeta_{l_{p,n}} A \bar{V}^2 \bar{x} = \frac{2}{3} \bar{D}^{3/2} + C. \quad (19)$$

Константу інтегрування знаходимо з граничних умов в кінці труби $\bar{x}_k = \frac{1}{2A}$; $\bar{D}_k = 0$, тоді:

$$C = -\zeta_{l_{p,n}} \bar{V}^2. \quad (20)$$

Її підстановка в (19) і необхідні скорочення призводять до залежності:

$$\bar{D} = \sqrt[3]{\left[\frac{3}{2} \zeta_{l_{p,n}} \bar{V}^2 (1 - 2A\bar{x})\right]^2} \quad (21)$$

або

$$\bar{D} = \sqrt[3]{\left[\frac{3}{2} \zeta_{l_{p,n}} \bar{V}^2 \left(1 - \frac{x}{l}\right)\right]^2}. \quad (22)$$

Графік залежності (22) приведено на рис. 2.

В початковому перерізі при $\bar{x}_n = 0$ ($x_n=0$), $\bar{D}_n = 1$, отримаємо:

$$\bar{D}_n = \sqrt[3]{\left(\frac{3}{2} \zeta_{l_{p,n}} \bar{V}^2\right)^2} = 1. \quad (23)$$

Зміна відносної п'єзометричної лінії може бути описана залежністю, яка

отримана з (15), підстановкою (22). Після нескладних скорочень маємо:

$$\bar{h} = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \zeta_{l_{p,n}} \bar{V}^2 \left(1 - \frac{x}{l}\right)}. \quad (24)$$

В розмірних одиницях діаметр трубопроводу в довільному перерізі буде:

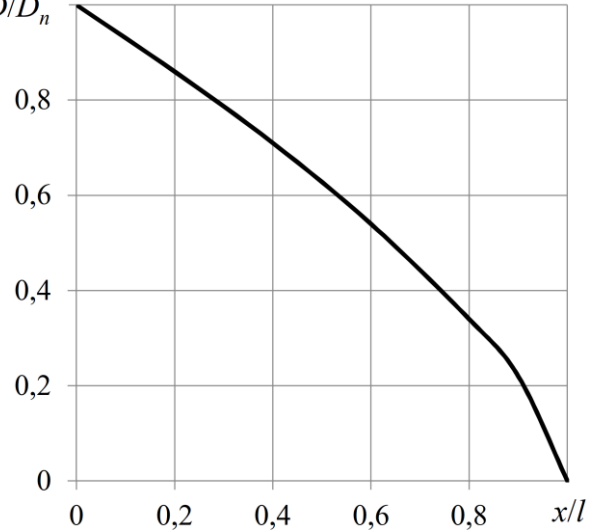


Рис. 2. Зміна відносного діаметра розподільчого трубопроводу при збереженні постійної середньої швидкості руху рідини в перерізах за довжиною труби

Fig. 2. Variation in the relative diameter of the distribution pipeline while maintaining a constant average fluid velocity in sections along the pipe length

$$D = D_n \sqrt[3]{\left[\frac{3}{h_n} \zeta_{l_{p,n}} \frac{V^2}{2g} \left(1 - \frac{x}{l}\right)\right]^2}, \text{ м.} \quad (25)$$

Для початкового перерізу знаходимо:

$$D_n = \frac{3}{h_n} \lambda_p l \frac{V^2}{2g}, \text{ м.} \quad (26)$$

Зміна п'єзометричної лінії:

$$h = \sqrt[3]{3\zeta_{l_{p,n}} h_n^2 \frac{V^2}{2g} \left(1 - \frac{x}{l}\right)}, \text{ м.} \quad (27)$$

Напір в початковому перерізі:

$$h_n = 3\zeta_{l_{p,n}} \frac{V^2}{2g}, \text{ м.} \quad (28)$$

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У ході дослідження на основі аналізу диференційних рівнянь, які описують рух рідини у напірних розподільчих дренажних трубопроводах змінного (такого, що

зменшується) перерізу за довжиною, розроблена досить проста і зручна у використанні методика розрахунку їх основних гідравлічних характеристик і конструктивних параметрів. Представлені відповідні розрахункові залежності і допоміжні графіки.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Watanabe T.** How do irrigation and drainage play an important role in climate change adaptation? // *Irrigation and drainage*. 2016. Vol. 65, No 2. P. 189-196.
2. **Kadiresan K., Khanal P. R.** Rethinking irrigation for global food security // *Irrigation and drainage*. 2018. Vol. 67, No 1. P. 8-11.
3. **De Wrachien D., Schultz B., Goli M. B.** Impacts of population growth and climate change on food production and irrigation and drainage needs: A world-wide view // *Irrigation and Drainage*. 2021. Vol. 70, No 5. P. 981-995.
4. **Playan E., Mateos L.** Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity // *Agricultural water management*. 2006. Vol. 80, No 1-3. P. 100-116.
5. **Levidow L., Zaccaria D., Maia R., Vivas E., Todorovic M., Scardigno A.** Improving water-efficient irrigation: Prospects and difficulties of innovative practices // *Agricultural Water Management*. 2014. Vol. 146. P. 84-94.
6. **Кравчук А., Кравчук О.** Визначення ефективних конструктивних характеристик збірних дренажних трубопроводів меліоративних систем // Будівельні конструкції. Теорія і практика. 2023. № 13. С. 149-159.
7. **Олейник А. Я., Поляков В. Л.** Дренаж переувлажненних земель. Киев: Наукова думка, 1987. 279 с.
8. **Liu H., Zong Q., Lv H., Jin J.** Analytical equation for outflow along the flow in a perforated fluid distribution pipe // *PLoS One*. 2017. 12(10):e0185842.
9. **Oyarce P., Gurovich L., Guarte V.** Experimental evaluation of agricultural drains // *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2017. Vol. 143, No 4. 143(4):04016082.
10. **Турченко В. О., Рокочинський А. М., Вовк П. П., Приходько Н. В., Ричко Д. М.** Комплекс заходів з підвищення ефективності функціонування рисових зрошувальних систем // Вісник НУВГП. Серія «Технічні науки». 2018. Т. 4, № 84. С. 3-21.
11. **Кравчук А. М., Чернишев Д. О., Кравчук О. А.** Гідравліка напірних перфорованих

трубопроводів очисних споруд систем водопостачання та водовідведення: монографія. Київ: КНУБА, 2021. 204 с.

12. **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.
13. **Олейник А. Я.** Гидрогазодинамика дренажа. Киев: Наукова думка, 1981. 284 с.
14. **Кравчук О. А.** До гідравлічного розрахунку напірних дренажних трубопроводів, які працюють в режимі роздачі // *Комунальне господарство міст*. 2021. Вип. 163. С. 68-74.
15. **Кравчук А., Кравчук О.** Розрахунок розподільчих дренажних трубопроводів, прокладених з похилом // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2023. Вип. 42. С. 35-41.
16. **Двайт Г. Б.** Таблицы интегралов и другие математические формулы / Перевод с английского Н.В. Леви под редакцией К.А. Семендяева. Москва: Наука, 1977. 228 с.

REFERENCES

1. **Watanabe, T. (2016).** How do irrigation and drainage play an important role in climate change adaptation? *Irrigation and drainage*, 65(2), 189-196. <https://doi.org/10.1002/ird.1980>.
2. **Kadiresan, K., & Khanal, P. R. (2018).** Rethinking irrigation for global food security. *Irrigation and drainage*, 67(1), 8-11. <https://doi.org/10.1002/ird.2219>
3. **De Wrachien, D., Schultz, B., & Goli, M. B. (2021).** Impacts of population growth and climate change on food production and irrigation and drainage needs: A world-wide view. *Irrigation and Drainage*, 70(5), 981-995. <https://doi.org/10.1002/ird.2597>
4. **Playan, 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>
5. **Levidow, L., Zaccaria, D., Maia, R., Vivas, E., Todorovic, M., & Scardigno, A. (2014).** Improving water-efficient irrigation: Prospects and difficulties of innovative practices. *Agricultural Water Management*, 146, 84-94. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.012>
6. **Kravchuk, A., & Kravchuk, O. (2023).** Determination of effective structural characteristics of collective drainage pipelines for meliorative systems. *Building constructions. Theory and practice*, (13), 149-159. [in Ukrainian]

<https://doi.org/10.32347/2522-4182.13.2023.149-159>

7. Oleynik, O. Ya., & Poliakov, V. L. (1987). *Drainage of wetlands*. Kyiv: Naukova dumka, 279. [in Russian]

8. Liu, H., Zong, Q., Lv, H., & Jin, J. (2017). Analytical equation for outflow along the flow in a perforated fluid distribution pipe. *PLoS One* 12(10):e0185842. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185842>

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

10. Turcheniuk, V. O., Rokochynskyi, A. M., Volk, P. P., Prykhodko, N. V., & Rychko, D. M. (2019). Complex of measures to improve the efficiency of functioning of figured extractive systems. *Bulletin of NUWEE. Technical Sciences*, 4(84). 3-21. [in Ukrainian] <https://doi.org/10.31713/vt420181>

11. 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. 204. [in Ukrainian].

12. 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>

13. Oleynik, A. Ya. (1981). *Geogidrodinamika drenazha*. Kyiv: Naukova dumka, 284. [in Russian]

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

15. Kravchuk, A., & Kravchuk, O. (2023). Calculation of distribution drainage pipelines laid with a slope. *Problems of Water Supply, Sewerage and Hydraulics*, 42, 35-41. [in Ukrainian] <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.42.35-41>

16. Dvayt, G. B. (1977). *Tables of integrals and other mathematical formulas*. Translated from English by N. V. Levy, edited by K. A. Semendyaev. Moscow, USSA: Nauka. 228. [in Russian]

Determination of the diameter variation peculiarities along the path of distribution drainage pipeline

Andriy Kravchuk, Oleksandr Kravchuk, Roman Chabaniuk, Olga Kravchuk

Abstract. This article presents a methodology for calculating the hydraulic characteristics and structural parameters of variable (decreasing) cross-sectional distribution pressure drainage pipelines. The approach is based on analyzing a system of differential equations describing fluid flow with a variable flow rate in the investigated pipes. The study explores the most general case of distributor operation, considering a horizontal groundwater level above the pipeline. The analysis of the original equations includes a scenario where a constant average fluid flow rate is maintained along the length of the pressure channel. The velocity magnitude is influenced by the granulometric features of the surrounding soil and the filtration characteristics of the pipeline's side walls material. The investigation employs the concept of a conditional distribution infinitely long pipeline or a pipeline with limited length and infinite permeability of the side walls surface. This allows assuming a pressure close to zero at the pipeline's final cross-section, which minimally impacts the obtained results. The analysis is presented in a dimensionless form, and the resulting computational formulas are both simple and convenient. The article includes corresponding graphs to illustrate the presented dependencies.

Keywords: distribution drainage pipeline, hydraulic friction factor, hydraulic conductivity, filtration resistance, variable flow rate.

Стаття надійшла до редакції 18.02.2024