РОЗРАХУНОК РОЗПОДІЛЬЧИХ ДРЕНАЖНИХ ТРУБОПРОВОДІВ, ПРОКЛАДЕНИХ З ПОХИЛОМ

Андрій Кравчук[1], Олександр Кравчук[2]

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, пр. Повітрофлотський, м. Київ, Україна, 03037
[1]докт. техн. наук, професор, kravchuk.am@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0001-8732-9244
[2]канд. техн. наук, доцент, kravchuk.oa2@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0001-6578-8896

DOI: 10.32347/2524-0021.2023.42.35-41

Анотація. В даній роботі представлені досить прості і зручні для застосування аналітичні залежності для розрахунку основних гідравлічних і конструктивних характеристик розподільчих дренажних трубопроводів, що прокладені з певним похилом. Вони запропоновані на основі аналізу системи диференційних рівнянь, яка складається з рівняння гідравліки змінної маси і модифікованого рівняння фільтрації, і описує рух рідини у таких трубопроводах. Розв'язки вихідної системи рівнянь отримані за припущення нехтування членом, який враховує ефект зміни витрати вздовж шляху. При аналізі використано поняття нескінченно довгого розподільчого дренажного трубопроводу, який прокладений з похилом, або, що те ж саме, похильного трубопроводу з нескінченною фільтраційною спроможністю стінок бічної поверхні. За запропонованими формулами проведена серія розрахунків основних характеристик даних труб при різних значеннях похилу, для наочності побудовані відповідні графічні залежності. Показано, що величина геометричного похилу прокладання напірного розподільчого дренажного трубопроводу, разом з коефіцієнтом опору і узагальненим параметром A, суттєво впливає на розрахункові параметри таких труб.

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

ВСТУП

На сьогоднішній день напірні перфоровані трубопроводи, які працюють зі змінною витратою вздовж шляху, досить широко застосовуються у різних галузях господарства [1]. Зокрема, вони використовуються у сільському господарстві для управління водним режимом ґрунтів на меліорованих землях [2,3]. Вдосконалення та інтенсифікація роботи даних систем безумовно є актуальними [4].

Методики інженерного розрахунку напірних дренажних трубопроводів в різних умовах розглядаються у роботах багатьох дослідників [5-7]. Однак більшість авторів досліджували варіант горизонтальної прокладки дренажних труб, коли впливом похилу дренажного трубопроводу на його розрахункові параметрами можна знехтувати. Проте на практиці для отримання достовірних результатів вплив похилу необхідно враховувати.

В даній роботі аналізується рух потоку зі змінною витратою у розподільчих напірних дренажних трубопроводах, які прокладені з похилом. Витікання рідини з цих труб в навколишнє середовище здійснюється через бічні стінки з малими швидкостями в режимі фільтрації [8]. Дані трубопроводи знаходять широке застосування при проєктуванні меліоративних систем двосторонньої дії для забезпечення необхідного рівня підйому ґрунтових вод.

© Кравчук А., Кравчук О., 2023

МЕТА І МЕТОДИ

Метою даної роботи є розробка методики інженерного розрахунку розподільчих напірних дренажних трубопроводів, які прокладені з похилом. В результаті розрахунку при відомих конструктивних і фільтраційних характеристиках системи планується отримати відповідні гідравлічні параметри потоку або вирішувати зворотну задачу – при відомих гідравлічних параметрах розраховувати реальні конструктивні і фільтраційні характеристики системи.

Для досягнення поставленої мети застосовувались методи математичного аналізу приведених до безрозмірного вигляду вихідних диференційних рівнянь, які описують рух рідини зі змінною витратою в даному випадку.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОЯСНЕННЯ

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 відбору рідини за довжиною дрени складно. Тому, зазвичай, їх враховують комплексно введенням спеціального фільтраційного опору системи «дрена–ґрунт» Φ. 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.

В залежності від рельєфу місцевості, розподільчі дренажні трубопроводи можуть прокладатись як горизонтально, так і з прямим або зворотним похилом. Під прямим похилом ($i > 0$) будемо розуміти випадок, коли відмітки лотка збірної дренажної труби знижуються за довжиною від початкового до кінцевого перерізу. Зворотним похилом ($i < 0$) вважається протилежний варіант, коли відмітки лотка підвищуються вздовж труби.

Поверхня ґрунтових вод при цьому також може бути або горизонтальною, або мати прямий чи зворотний похил. В представленій статті розглядається випадок горизонтального положення рівня поверхні ґрунтових вод.

Розрахункова схема для даного випадку приведена на рис. 1.

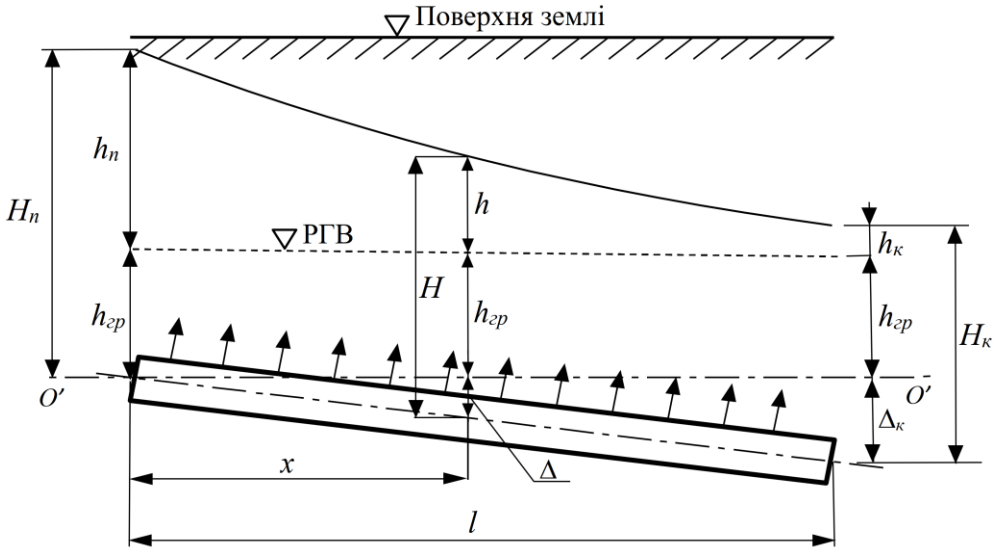

Рис. 1. Схема роботи уклінного розподільчого дренажного трубопроводу при горизонтальному рівні поверхні ґрунтових вод (РГВ)

Fig. 1. Scheme of the sloping distribution drainage pipeline operation at the horizontal level of the ground water surface

Як відомо, рух рідини в даному випадку описується системою диференційних рівнянь, яка складається з рівняння гідравліки змінної маси (1) і модифікованого рівняння фільтрації (2) [9-11]:

$$\frac{dH}{dx}+\frac{2}{g}V_i\frac{dV_i}{dx}+\frac{\lambda_p}{2gD}V_i^2\pm i=0 \qquad (1)$$

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

де $H = h + h_{гр} + \Delta$ – повний напір в дрені; $h_{гр}$ – відстань від осі початкового перерізу труби до поверхні ґрунтових вод; $h = H - h_{гр} - \Delta$ – змінний за довжиною перепад напорів, під дією якого відбувається витікання рідини з труби в навколишнє середовище; $dH = dh \pm idx$; $\frac{\Delta_к}{l} = \pm i$ – геометричний похил прокладання трубопроводу; V_i, D, Ω – відповідно, витрата, середня швидкість, діаметр і площа живого перерізу потоку на відстані x від початку похильного трубопроводу; $\overline{\Phi}$ – фільтраційний опір дрени (його визначення представляє окрему фільтраційну задачу) [8]; k_ϕ – коефіцієнт фільтрації ґрунту навколо труби; λ_p – гідравлічний коефіцієнт тертя дренажного трубопроводу; g – прискорення вільного падіння.

В рівнянні (1) верхній знак при похилі ґрунтових вод (в даному випадку «+») відповідає прямому похилу трубопроводу, нижній («–») – зворотному.

Використавши наведені вище співвідношення, а також ввівши нові змінні

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

вихідна система рівнянь зводиться до безрозмірного вигляду:

$$\frac{d\bar{h}}{d\bar{x}}+2\overline{V}_i\frac{d\overline{V}_i}{d\bar{x}}+\zeta_{l_p}A\overline{V}_i^2\pm B=0 \qquad (4)$$

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

де $\zeta_{l_p}=\lambda_p\frac{l}{D}$ – коефіцієнт опору розподільчого дренажного трубопроводу; $A=\frac{1}{2\bar{x}_к}=\frac{\Omega\overline{\Phi}}{2k_\phi l}\sqrt{\frac{g}{h_n}}$ – узагальнений параметр розподільчої дрени, який враховує її конструктивні і фільтраційні характеристики; $B=\frac{ilA}{h_n}$ – параметр, який враховує вплив похилу дрени на характеристики потоку.

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.

В дренажних зволожуючих системах трубопроводи, як правило, мають відносно велику довжину. Тому, впливом другого члена в рівнянні (4) без суттєвої похибки, можна знехтувати [12], маємо:

$$\frac{d\bar{h}}{d\bar{x}}=\zeta_{l_p}A\overline{V}_i^2\pm B. \qquad (6)$$

Підставивши (5) в (6) і розділивши змінні, отримаємо:

$$\bar{h}d\bar{h}=\zeta_{l_p}A\overline{V}_i d\overline{V}_i\pm Bd\overline{V}_i. \qquad (7)$$

Інтегруємо рівняння (7) [13]:

$$\frac{\bar{h}^2}{2}=\zeta_{l_p}A\frac{\overline{V}_i^3}{3}\pm B\overline{V}_i+C. \qquad (8)$$

Константу інтегрування знаходимо з граничних умов: в кінці трубопроводу $\bar{h}=\bar{h}_к$; $\overline{V}_{к.i}=0$, тоді $C=\frac{\bar{h}_к^2}{2}$.

Підставивши в (8), остаточно отримаємо:

$$\bar{h}^2-\bar{h}_к^2=\frac{2\zeta_{l_p}A}{3}\overline{V}_i^3\pm 2B\overline{V}_i. \qquad (9)$$

З (9) в початковому перерізі реальної труби буде:

$$1-\bar{h}_к^2=\frac{2\zeta_{l_p}A}{3}\overline{V}_{n.i}^3\pm 2B\overline{V}_{n.i}. \qquad (10)$$

Для подальшого аналізу використаємо поняття розподільчого дренажного трубопроводу нескінченної довжини ($l\to\infty$, $\zeta_{l_p}\to\infty$). Для нього перепадом напорів в кінцевому перерізі можна знехтувати, тобто

приймається $\bar{h}_к \to 0$. Тоді, залежність (10) прийме вигляд:

$$\frac{2\zeta_{l_p} A}{3}\bar{V}^3_{n.\infty.i} \pm 2B\bar{V}_{n.\infty.i} = 1. \qquad (11)$$

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

Для знаходження відносної початкової витрати в умовному нескінченно довгому похильному розподільчому трубопроводі можна користуватись графіком на рис. 2.

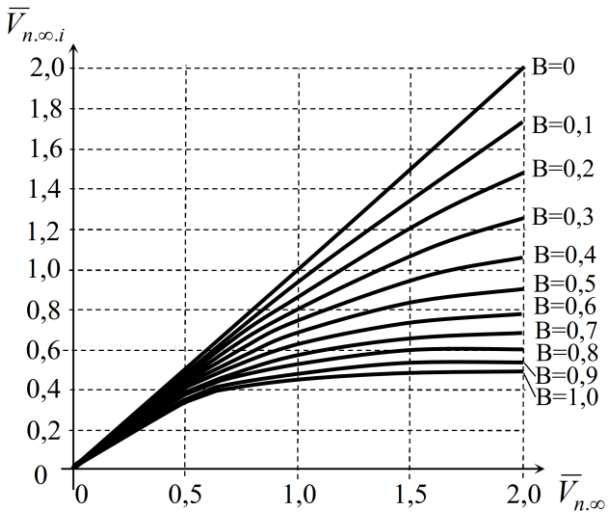

Рис. 2. Графік залежності (11)
Fig. 1. Graph of dependency (11)

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

$$\bar{V}_{n.\infty} = \bar{V}_{ф.n} = \sqrt[3]{\frac{2\zeta_{l_{ф.p}} A_ф}{3}}. \qquad (12)$$

Як показано в роботі [14], для фіктивного розподільчого горизонтального дренажного трубопроводу нескінченної довжини залежність між діючим відносним перепадом напорів і відносною довжиною має вигляд:

$$\bar{h}_ф = \sqrt{\frac{2\zeta_{l_p} A_ф}{3}\bar{V}^3_ф}\,. \qquad (13)$$

Прирівнявши залежність (9), для нескінченно довгого похильного дренажного трубопроводу (за умови $\bar{h}_к \to 0$) і вираз (13), отримаємо:

$$\frac{2\zeta_{l_p} A}{3}\bar{V}_i^3 \pm 2B\bar{V}_i - \frac{2\zeta_{l_{ф.p}} A_ф}{3}\bar{V}^3_ф = 0. \qquad (14)$$

З останнього кубічного рівняння, при відомому $\bar{V}_ф$, розраховуємо $\bar{V}_i$.

Підставимо отримане значення $\bar{V}_i$ в залежність для описання величини відносної витрати в горизонтальному розподільчому трубопроводі, яка отримана в роботі [14]:

$$\bar{V} = \bar{V}_{n.\infty}\left[\frac{1}{\left(1+\frac{\bar{x}}{2\bar{V}_{n.\infty}}\right)^2} - \frac{1}{\left(1+\frac{\bar{x}_к}{2\bar{V}_{n.\infty}}\right)^2}\right]. \qquad (15)$$

Після нескладних перетворень з останнього виразу знаходимо відстань до перерізу дренажного похильного трубопроводу, в якому відносна швидкість буде дорівнювати $\bar{V}_i$:

$$\bar{x} = 2\bar{V}_{n.\infty}\left[\sqrt{\frac{1}{\frac{\bar{V}_i}{\bar{V}_{n.\infty}} + \frac{1}{\left(1+\frac{\bar{x}_к}{2\bar{V}_{n.\infty}}\right)^2}}} - 1\right]. \qquad (16)$$

Для визначення співвідношень між $\bar{x}$ і $\bar{x}_ф$, при яких відносні швидкості в перерізах реального і фіктивного трубопроводів будуть рівні ($\bar{V}_i = \bar{V}_ф$), підставимо $\bar{V}_ф$ з (13) в отриману в роботі [15] залежність, маємо:

$$\bar{h} = \sqrt{\frac{2\zeta_{l_p} A}{3}\bar{V}_\phi^3 \pm 2B\bar{V}_\phi}\ . \qquad (17)$$

Використання знайденої величини $\bar{h}$ призводить до співвідношення:

$$\bar{x} = 2\bar{V}_\phi\left(\frac{1}{\sqrt[3]{\bar{h}}} - 1\right). \qquad (18)$$

Отже, вирази (16) і (18), відповідно, дозволяють визначити значення відносної координати $\bar{x}$ реального трубопроводу в залежності від відносної координати $\bar{x}_\phi$ фіктивного трубопроводу, при яких величини відносних напорів $\bar{h}$ і $\bar{h}_\phi$ або швидкостей $\bar{V}_i$ і $\bar{V}_\phi$ будуть рівні між собою.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

В роботі на основі аналізу диференційних рівнянь, які описують рух рідини в розподільчих напірних дренажних трубопроводах, які прокладені з похилом *i*, запропоновано відносно прості аналітичні залежності і допоміжні графіки для їх розрахунку. При проведенні аналізу введено поняття нескінченно довгого похильного дренажного трубопроводу або трубопроводу з нескінченною величиною просякнення бічної поверхні стінок труби. Оцінено вплив величини похилу на розрахункові параметри таких труб при їх різних конструктивних характеристиках. Приведені формули рекомендуються для застосування в широкому діапазоні зміни параметрів дренажних труб, що прокладені з похилом. Для подальшого розвитку даного напрямку досліджень вважаємо за необхідне більш детальне вивчення внутрішньої гідродинаміки потоку рідни в напірних розподільчих дренажних трубопроводах.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Бігун І. В.** Особливості застосування напірних розподільних трубопроводів у різних технічних системах // Theory and Building Practice. 2019. Т.1, вип. 2. С. 14-20.
2. **Schultz B., Thatte C. D., Labhsetwar V. K.** Irrigation and drainage. Main contributors to global food production // Irrigation and Drainage. 2005. Vol. 54, No 3. P. 263-278.
3. **Valipour M., Krasilnikof J., Yannopoulos S., Kumar R., Deng J., Roccaro P., Mays L., Grismer M. E., Angelakis A. N.** The evolution of agricultural drainage from the earliest times to the present // Sustainability. 2020. No 12 (1), 416.
4. **Castellano M. J., Archontoulis S. V., Helmers, M. J., Poffenbarger, H. J., Six J.** Sustainable intensification of agricultural drainage // Nature Sustainability. 2019. No 2. P. 914-921.
5. **Олейник А. Я., Поляков В. Л.** Дренаж переувлажненных земель. Київ: Наукова думка, 1987. 279 с.
6. **Liu H., Zong Q., Lv H., Jin J.** Analytical equation for outflow along the flow in a perforated fluid distribution pipe // PLoS ONE. 2017. No 12 (10): e0185842.
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.
8. **Олейник А. Я.** Геогидродинамика дренажа. Київ: Наукова думка, 1981. 284 с.
9. **Безусяк А. В., Дмитриев А. Ф., Пивовар Н. Г.** Гидравлический расчет коллекторов-распределителей // Мелиорация и водное хозяйство. 1987. Вып. 67. С. 52-59.
10. **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.
11. **Кравчук А. М., Кравчук О. А.** Визначення характеристик розподільчих дренажних трубопроводів при пропуску транзитної витрати // Науковий вісник будівництва. 2021. Т. 105, вип. 3. С. 123-129.
12. **Kravchuk O. A.** Particularities of hydraulic calculation of collecting pressure drainage pipelines // Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. 2021. No. 83. P. 130-138.
13. **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.
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. М., Кравчук О. А.** Вплив величини похилу на розрахункові параметри збірних дренажних трубопроводів // Сучасне будівництво та архітектура. 2022. Вип. 2. С. 88-96.

REFERENCE

1. **Bihun, I. (2019).** Peculiarities of application pressure distributive pipelines in different engineering systems. *Theory and Building Practice*, *1*(2). 14-20. [in Ukrainian] https://doi.org/10.23939/jtbp2019.02.014
2. **Schultz, B., Thatte, C. D. & Labhsetwar, V. K. (2005).** Irrigation and drainage. Main contributors to global food production. *Irrigation and Drainage*, *54*(3), 263-278. https://doi.org/10.1002/ird.170
3. **Valipour, M., Krasilnikof, J., Yannopoulos, S., Kumar, R., Deng, J., Roccaro, P., Mays, L., Grismer, M. E. & Angelakis, A. N. (2020).** The evolution of agricultural drainage from the earliest times to the present. *Sustainability*, *12*(1), 416. https://doi.org/10.3390/su12010416
4. **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
5. **Oleynik, O. Ya. & Poliakov, V. L. (1987).** *Drainage of wetlands*. Kyiv, USSA: Naukova dumka, 279. [in Russian]
6. **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
7. **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*, *Vol. 6*, *7*(114), 93-103. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.246852
8. **Oleynik, O. Ya. (1981).** *Geohydrodynamics of drainage*. Kyiv: Naukova dumka, 284. [in Russian]
9. **Bezusyak, A. V., Dmitriev, A. F. & Pivovar, N. G. (1987).** Hydraulic calculation of collectors-distributors. *Reclamation and water management*, *67*, 52-59. [in Russian]
10. **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]
11. **Kravchuk, A. M.** & **Kravchuk, O. A. (2021).** Determination of distribution drainage pipelines characteristics when passing transit flow. *Scientific Bulletin of Civil Engineering*, *105*(3). 123-129. [in Ukrainian] https://doi.org/10.29295/2311-7257-2021-105-3-123-129
12. **Kravchuk, O. A. (2021).** Particularities of hydraulic calculation of collecting pressure drainage pipelines. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, *83*. 130-138. https://doi.org/10.31650/2415-377X-2021-83-130-138
13. **Dvayt, G. B. (1977).** *Tables of integrals and other mathematical formulas*. Translated from English by N. V. Levy, edited by K. A. Semendyaev. Moskow: Nauka. 228. [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. M.** & **Kravchuk, O. A. (2022).** Evaluation of the impact of transit flow rate on the distribution drainage pipelines characteristics. *Modern construction and architecture*, *2*. 88-96. [in Ukrainian] https://doi.org/10.31650/2786-6696-2022-2-88-96

Calculation of distribution drainage pipelines laid with a slope

Andriy Kravchuk, Oleksandr Kravchuk

Abstract. Quite simple and easy-to-use analytical dependencies for calculation of the main hydraulic and structural characteristics of distribution drainage pipelines, laid with a certain slope, are presented. They are proposed on the basis of the analysis of the differential equations system, which consists of the variable mass hydraulics equation and the modified filtration equation, and describes the fluid motion in such pipelines. The solutions of the original equations system are obtained under the assumption of neglecting the term that takes into account the effect of the flow rate variation along the path. The analysis uses the concept of an infinitely long distribution drainage pipeline, which is laid with a slope, or, what is the same, an inclined pipeline with an infinite filtration capacity of the side surface walls. Series of calculations of the main pipelines characteristics at different slope values were carried out according to the proposed formulas. Corresponding graphic dependencies were constructed for clarity. It is shown that the geometric slope of the pressure distribution drainage pipeline, the resistance factor and the generalized parameter *A* significantly affects the design parameters of such pipes.

Keywords: distribution perforated pipeline, hydraulic friction factor, hydraulic conductivity, filtration resistance, geometric slope of the drainage pipe, variable fluid flow.

Стаття надійшла до редакції 28.02.2023