

УДК 532.5 : 631.62

Розрахунок горизонтальних збірних дренажних трубопроводів меліоративних систем при наявності похилу рівня ґрунтових вод

Андрій Кравчук¹, Олександр Кравчук²,
Вероніка Барладіна³, Владислав Перебийніс⁴

^{1,2,3,4} Київський національний університет будівництва і архітектури,
Повітрофлотський просп. 31, Київ, Україна, 03037,

¹ kravchuk.am@knuba.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0001-8732-9244>,

² kravchuk.oa2@knuba.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0001-6578-8896>,

³ barladina_va@knuba.edu.ua, <http://orcid.org/0009-0009-7670-0912>,

⁴ perebyinis_vy@knuba.edu.ua, <http://orcid.org/0009-0007-8811-2777>

Received: 15.11.2023; Accepted: 18.12.2023

<https://doi.org/10.32347/gbdmm.2023.102.0501>

Анотація. Розглянута система з двох диференціальних рівнянь за допомогою яких описують рух рідини в дренажній трубі зі змінною витратою, а також умови входу в неї рідини з навколишнього ґрунту через бічні стінки в режимі фільтрації. Вона складається з рівняння гідравліки змінної маси і модифікованого рівняння фільтрації. Даний трубопровід прокладений горизонтально при наявності похилу поверхні рівня ґрунтових вод (РГВ). Показано, що в даному випадку, без суттєвої похибки другим членом в першому рівнянні можна знехтувати. Шляхом введення нових змінних вихідна система зводиться до безрозмірного вигляду. Представлено розв'язок даної системи рівнянь.

Показано, що в даному випадку розв'язок вихідної системи рівнянь залежить від величини трьох основних факторів: коефіцієнта опору збірному дренажному трубопроводу « ζ »; узагальненого параметра « A », який комплексно враховує конструктивні і фільтраційні характеристики розглядуваного потоку; похилу рівня ґрунтових вод « l ». При аналізі використано поняття нескінченно довгого горизонтального дренажного трубопроводу, який працює при наявності похилу РГВ, або, що теж саме, трубопроводу з нескінченною фільтраційною спроможністю стінок бічної поверхні. Відмічається, що такий трубопровід буде мати максимальну пропускну спроможність в порівнянні з таким же трубопроводом обмеженої довжини. На основі проведеного аналізу отримано відносно прості і зручні у використанні аналітичні залежності для розрахунку характеру зміни витрати

і перепаду напорів за довжиною даного дренажного трубопроводу.

Для спрощення розрахунків запропоновано відповідні допоміжні графічні залежності. Підтверджено, що величина геометричного похилу РГВ, поряд з коефіцієнтом опору і узагальненим параметром, суттєво впливає на розрахункові параметри таких труб.

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

ВСТУП

На сьогоднішній день найбільш ефективна експлуатація сільськогосподарських угідь має місце на ділянках, які обладнані меліоративними системами [1, 2]. Основними їх елементами слугують збірні і розподільчі дренажні трубопроводи. Головним призначенням останніх є створення в ґрунті оптимального вологісного режиму для вирощування сільськогосподарської продукції [3, 4]. При проектуванні і експлуатації дренажних трубопроводів, в залежності від місцевих умов, рівень ґрунтових вод на місцевості може бути як горизонтальним, так і мати певний похил вільної поверхні.

При цьому вважається, що надходження рідини в збірний дренажний трубопровід здійснюється безперервно і нерівномірно за його довжиною. Суттєвий вплив на харак-

тер притоку повинен мати склад ґрунту та матеріал фільтруючої поверхні дренажних трубопроводів, відстань між дренами і їх конструктивні особливості. Для врахування цих параметрів в даній роботі використано поняття фільтраційного опору дрени $\bar{\Phi}$ [5], який умовно вважається постійним вздовж труби.

Питаннями розробки методики інженерного розрахунку напірних збірних дренажних трубопроводів в різних умовах експлуатації присвячено досить велику кількість робіт [6-8]. При цьому розглядаються випадки роботи даних труб з рівномірним [9] і нерівномірним [10] приєднанням рідини вздовж шляху. Як правило, при аналізі роботи дренажних перфорованих трубопроводів застосовувались рівняння руху рідини зі змінною витратою [11]. Отримані на їх основі розрахункові залежності з тим чи іншим ступенем точності описують розглядуваний процес. Однак практично всі автори в своїх дослідженнях розглядали варіант роботи дренажних труб при горизонтальному рівні РГВ. В той час, досить часто на практиці РГВ має певний похил і його необхідно враховувати для отримання реальних результатів.

МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є розробка методики розрахунку параметрів напірних горизонтальних збірних трубопроводів меліоративних систем, які працюють при наявності похилу рівня ґрунтових вод.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Як відомо, при проектуванні меліоративних систем, в залежності від гідрогеологічної ситуації і рельєфу місцевості збірні дренажні трубопроводи можуть працювати при прямому чи зворотному похилі РГВ. Під прямим похилом ($I > 0$) будемо розуміти випадок, коли рівень РГВ знижується за довжиною дренажної труби від початкового до кінцевого перерізу. Зворотнім похилом ($I < 0$) вважається протилежний варіант, коли рівень РГВ підвищуються вздовж труби.

Розглянемо основний, найбільш характерний, випадок роботи горизонтальних збірних дренажних трубопроводів, які працюють без транзиту, прямому похилі рівня поверхні ґрунтових вод. Розрахункова схема роботи дрени для цього випадку приведена на рис. 1.

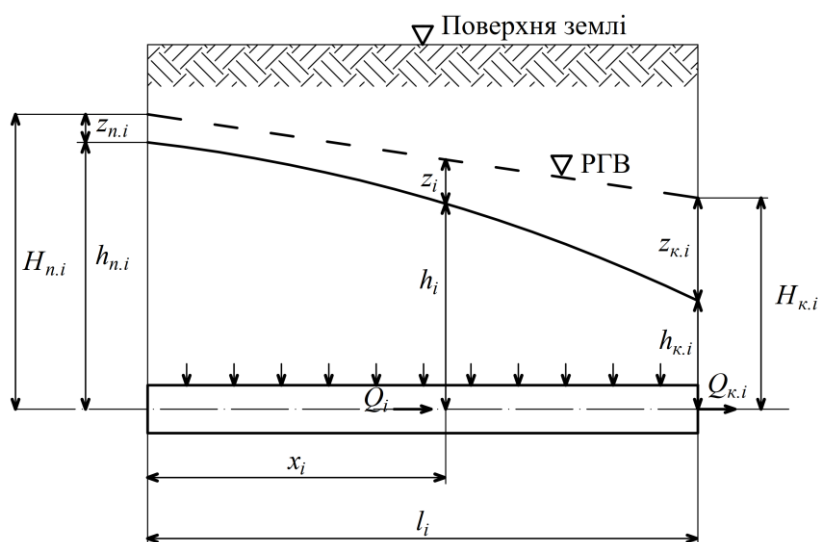


Рис. 1. Схема роботи горизонтального збірного дренажного трубопроводу при наявності прямого похилу РГВ

Fig. 1. Scheme of the horizontal collective drainage pipeline operation in the presence of the direct ground water level slope

Як відомо, рух рідини в даному випадку описується системою диференціальних рівнянь [12]: рівняння гідравліки змінної маси (1), модифікованого рівняння фільтрації (2), які з урахуванням позначень на рис. 1 можуть бути представлені у вигляді:

$$\frac{dh_i}{dx_i} + \frac{2}{g} V_i \frac{dV_i}{dx_i} + \frac{\lambda_{зб}}{2gD} V_i^2 \mp I = 0 \quad (1)$$

$$q_i = \frac{d(V_i \Omega)}{dx_i} = \frac{k_\phi (H_i - h_i)}{\Phi} = k_\phi \frac{z_i}{\Phi}, \quad (2)$$

де $I = \frac{H_{ni} - H_{ik}}{l_i}$ – похил поверхні рівня

грунтових вод; H_{ni} – висота РГВ в початковому перерізі дренажного трубопроводу; $H_{k.i}$ – висота РГВ в кінцевому перерізі труби; H_i – висота РГВ в перерізі труби на відстані x_i від її початку; l_i – довжина дренажного трубопроводу; h_i – п'єзометричний напір в трубі на відстані x_i ; $z_i = H_i - h_i$ – змінний за довжиною перепад напорів, під дією якого відбувається втікання рідини з навколишнього середовища в трубопровід; Q , V , D , Ω – відповідно, витрата, середня швидкість, діаметр і площа живого перерізу потоку на відстані x_i від початку труби; $\bar{\Phi}$ – фільтраційний опір дрени; k_ϕ – коефіцієнт фільтрації ґрунту навколо труби; $\lambda_{зб}$ – гідравлічний коефіцієнт тертя дренажного трубопроводу [13]; g – прискорення вільного падіння.

З рис. 1 слідує: $H_i = H_{n.i} \mp I x_i$; $h_i = H_i - z_i = H_{n.i} \mp I x_i - z_i$; $dh_i = \mp I dx_i - dz_i$.

Використавши наведені вище співвідношення, а також ввівши нові змінні:

$$\bar{V}_i = \frac{V_i}{\sqrt{g z_{k.i}}}, \quad \bar{x}_i = \frac{k_\phi x_i}{\Omega \bar{\Phi}} \sqrt{\frac{z_{k.i}}{g}},$$

$$\bar{z}_i = \frac{z_i}{z_{k.i}}, \quad dh_i = -z_{k.i} d\bar{z}_i. \quad (3)$$

Вихідна система рівнянь зводиться до безрозмірного вигляду:

$$-\frac{d\bar{z}_i}{d\bar{x}_i} + 2\bar{V}_i \frac{d\bar{V}_i}{d\bar{x}_i} + \zeta_{l_{зб}} A \bar{V}_i^2 \mp B = 0 \quad (4)$$

$$\frac{d\bar{V}_i}{d\bar{x}_i} = \bar{z}_i, \quad (5)$$

де $\zeta_{l_{зб}} = \lambda_{зб} \frac{l_i}{D}$ – коефіцієнт опору збірного дренажного трубопроводу;

$A = \frac{1}{2\bar{x}_{k.i}} = \frac{\Omega \bar{\Phi}}{2k_\phi l_i} \sqrt{\frac{g}{z_{k.i}}}$ – узагальнений па-

раметр збірної дрени, який враховує її конструктивні і фільтраційні характеристики;

$B = \frac{2l_i A I}{z_{k.i}}$ – параметр, який враховує

вплив похилу РГВ на характеристики потоку в дрени.

Як показано в роботі [11] другим членом рівняння (4), який описує втрати напору, пов'язані з ефектом приєднання рідини, в зв'язку з його відносно малою величиною, можна знехтувати. Тоді воно прийме вигляд:

$$\frac{d\bar{z}_i}{d\bar{x}_i} = \zeta_{l_{зб}} A \bar{V}_i^2 \mp B. \quad (6)$$

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

$$\bar{z}_i d\bar{z}_i = \zeta_{l_{зб}} A \bar{V}_i^2 d\bar{V}_i \mp B d\bar{V}_i. \quad (7)$$

Інтегруємо його [14]:

$$\frac{\bar{z}_i^2}{2} = \zeta_{l_{зб}} A \frac{\bar{V}_i^3}{3} \mp B \bar{V}_i + C. \quad (8)$$

Константу інтегрування знаходимо з граничних умов: на початку труби $\bar{V}_{ni} = 0$;

$\bar{z}_i = \bar{z}_{n.i}$, тоді $C = \frac{\bar{z}_{n.i}^2}{2}$.

Підставивши в (8), остаточно отримаємо:

$$\bar{z}_i^2 - \bar{z}_{n.i}^2 = \frac{2A\zeta_{l_{зб}}}{3} \bar{V}_i^3 \mp 2B\bar{V}_i. \quad (9)$$

З (9) в кінцевому перерізі реальної труби буде:

$$1 - \bar{z}_{n,i}^2 = \frac{2A\zeta_{l_{3\phi}}}{3} \bar{V}_{k,i}^3 \mp 2B\bar{V}_{k,i}. \quad (10)$$

Для подальшого аналізу, за аналогією з роботою [15], використаємо поняття збірного дренажного трубопроводу нескінченної довжини ($l_i \rightarrow \infty, \zeta_{l_{3\phi}} \rightarrow \infty$). Для нього перепадом напорів в початковому перерізі можна знехтувати, тобто приймається $\bar{z}_{n,i} \rightarrow 0$. Тоді, залежність (10) набуде вигляду:

$$\frac{2A\zeta_{l_{3\phi}}}{3} \bar{V}_{k,\infty i}^3 \mp 2B\bar{V}_{k,\infty i} = 1, \quad (11)$$

де $\sqrt[3]{\frac{3}{2A\zeta_{l_{3\phi}}}} = \bar{V}_{k,\infty}$ – відносна швидкість ру-

ху води в кінці нескінченно довгого горизонтального трубопроводу з такими ж самими характеристиками, як і похилого.

За отриманою залежністю (кубічним рівнянням (11)) рекомендується розраховувати величину відносної швидкості в кінцевому перерізі умовного нескінченно довгого горизонтального трубопроводу при наявності похилу рівня РГВ. Для зручності при цьому також можна використовувати графік на рис. 2.

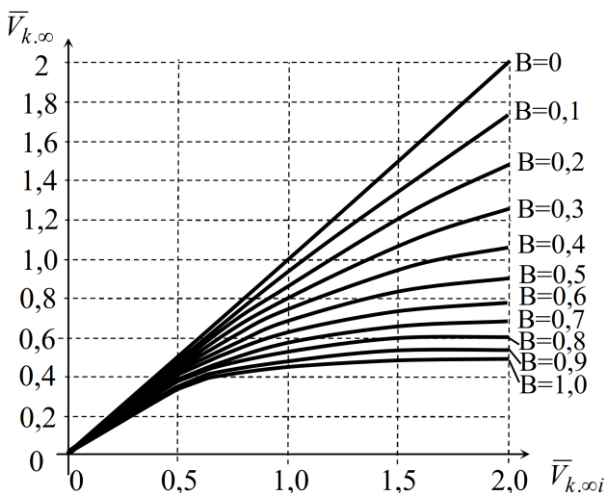


Рис. 2. Графік залежності (11)
Fig. 2. Graph of dependency (11)

В роботі [15] показано, що для отримання конкретних розрахункових залежностей в даному випадку, шляхом введення параметра фіктивного нескінченно довгого горизонтального трубопроводу A , який працює при горизонтальному рівні РГВ, можна використовувати співвідношення (12):

$$\bar{V}_{k,\infty i} = \bar{V}_{\phi,k\infty} = \sqrt[3]{\frac{3}{2\zeta_{l_{3\phi}} A}}. \quad (12)$$

Залежності для розрахунку основних характеристик розглядуваних трубопроводів мають вигляд:

- відносний перепад напорів за довжиною горизонтального дренажного трубопроводу, який працює при похилі РГВ:

$$\bar{z}_{\infty i} = \frac{1}{\left(1 + \frac{1-x/l}{4A\bar{V}_{k,\infty i}}\right)^3}; \quad (13)$$

- відносний перепад напорів на початку збірника ($\bar{x}_{n\infty} = 0$):

$$\bar{z}_{n,\infty i} = \frac{1}{\left[1 + \frac{1}{4A\bar{V}_{k,\infty i}}\right]^3}; \quad (14)$$

- відносна швидкість за довжиною збірного дренажного трубопроводу:

$$\bar{V}_{\infty i} = \bar{V}_{k,\infty i} \left[\frac{1}{\left(1 + \frac{1-x/l}{4A\bar{V}_{k,\infty i}}\right)^2} - \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{4A\bar{V}_{k,\infty i}}\right)^2} \right]; \quad (15)$$

- відносна швидкість в кінцевому перерізі збірника:

$$\bar{V}_{к.і} = \bar{V}_{к.∞і} \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{4A\bar{V}_{к.∞і}} \right)^2} \right]. \quad (16)$$

ВИСНОВКИ

В роботі на основі аналізу диференціальних рівнянь, які описують рух рідини в горизонтальних збірних напірних дренажних трубопроводах, які працюють при наявності похилу рівня ґрунтових вод, запропоновано відносно прості аналітичні залежності і допоміжні графіки для їх розрахунку. Приведені формули рекомендуються для застосування в широкому діапазоні зміни параметрів дренажних труб. Для подальшого розвитку даного напрямку досліджень вважаємо за необхідне більш детальне вивчення внутрішньої гідродинаміки потоку рідини в збірних дренажних трубопроводах.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Smedema L. K., Abdel-Dayem S., Ochs W.J.** Drainage and agricultural development // *Irrigation and Drainage Systems*. 2000. No 14. P. 223-235.
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. **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.
4. **Козішкурт С. М., Турченко В. О.** Методологічні та екологічні аспекти удосконалення розрахунку водних режимів сільськогосподарських культур // *Вісник НУВГП. Серія «Технічні науки»*. 2019. Т. 3, № 87. С. 19-27.
5. **Олейник А. Я., Поляков В. Л.** Дренаж переувлажненних земель. Київ: Наукова думка, 1987. 279 с.
6. **Олейник А. Я.** Геогідродинаміка дренажа. Київ: Наукова думка, 1981. 284 с.
7. **Kravchuk A., Kochetov G., Kravchuk O.** Improving the calculation of collecting per-

- rated pipelines for water treatment structures // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6, No. 10 (108). P. 23-28.
8. **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.
 9. **Кравчук А., Кочетов Г., Кравчук О.** Проектування трубопроводів для рівномірного збору води вздовж шляху // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2020. Вип. 33. С. 34-40.
 10. **Чернюк В. В., Іванів В. В., Ценюх М. Б.** Нерівномірність притоку води до напірного трубопроводу-збирача залежно від кута приєднання вхідних струменів // *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Т.29, № 9. С. 116-120.
 11. **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.
 12. **Кравчук А., Кравчук О., Ломако А., Кравчук О.** Зміна параметрів збірних дренажних трубопроводів при пропуску транзитної витрати // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2022. Вип. 41. С. 52-58.
 13. **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.
 14. **Двайт Г. Б.** Таблицы интегралов и другие математические формулы / Перевод с английского Н. В. Леви под редакцией К. А. Семендяева. М.: Наука, 1977. 228 с.
 15. **Кравчук А. М., Кравчук О. А.** Вплив величини похилу на розрахункові параметри збірних дренажних трубопроводів // *Сучасне будівництво та архітектура*. (2022). №2. С. 88-96.

REFERENCES

1. **Smedema, L. K., Abdel-Dayem S. & Ochs W. J.** (2000). Drainage and agricultural development. *Irrigation and Drainage Systems*, 14, 223-235. <https://doi.org/10.1023/A:1026570823692>
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. **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. **Kozishkurt, S. M. & Turcheniuk, V. O.** (2019). Methodological and environmental aspects of agricultural cultures water regimes calculation improvement. *Bulletin of the National University of Water and Environmental Engineering. Technical Sciences*, 3 (87), 19-27. (in Ukrainian). <https://doi.org/10.31713/vt320192>
 5. **Oleynik, A. Ya. & Polyakov, V. L.** (1987). *Drenazh pereuvlazhnennyih zemel*. Kyiv: Naukova dumka, 279. - (in Russian).
 6. **Oleynik, A. Ya.** (1981). *Geogidrodinamika drenazha*. Kyiv: Naukova dumka, 284. - (in Russian).
 7. **Kravchuk A., Kochetov G., Kravchuk O.** (2020). Improving the calculation of collecting perforated pipelines for water treatment structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6, No.10 (108), 23-28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.216366>
 8. **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)
 9. **Kravchuk, A., Kochetov, G. & Kravchuk, O.** (2020). Pipelines designing for steady water collection along the path. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, 33, 34-40. - (in Ukrainian). <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2020.33.34-40>
 10. **Cherniuk, V. V., Ivaniv, V. V., & Tsenyuh, M. B.** (2019). Dependence of non-uniformity of water inflow into pressure pipeline-collector on the angle of inflowing jets. *Scientific Bulletin of UNFU*, 29 (9), 116-120. - (in Ukrainian). <https://doi.org/10.36930/40290920>
 11. **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>
 12. **Kravchuk, A., Kravchuk, O., Lomako, A. & Kravchuk, O.** (2022). Variation of the collective drainage pipelines parameters when passing the transit flow. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, 41, 52-58. (in Ukrainian). <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2022.41.52-58>
 13. **Kravchuk, A., Cherniuk, V., Kravchuk, O. & Airapetian, T.** (2022). Assessing the value of the hydraulic friction factor in pipelines working with a flow connection along the path. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 5, 7 (119), 61-67. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265670>
 14. **Dvayt, G. B.** (1977). *Tablitsyi integralov i druzhie matematicheskie formulyi*, Perevod s angliyskogo N. V. Levi pod redaktsiyei K.A. Semendyaeva. Moscow, Nauka, 228. - (in Russian).
 15. **Kravchuk, A. M., & Kravchuk, O. A.** (2022). The slope influence on calculated parameters of collecting drainage pipelines. *Modern construction and architecture*, 2, 88-96. - (in Ukrainian). <http://visnyk-odaba.org.ua/2022-02/2-10.pdf>

Calculation of horizontal collective drainage pipelines of reclamation systems in the presence of a ground water level slope

Andriy Kravchuk¹, Oleksandr Kravchuk²,
Veronika Barladina³, Vladislav Perebyinis⁴

Kyiv National University of
Construction and Architecture

Abstract. The purpose of this work is to develop a methodology for calculating the parameters of pressure horizontal collective drainage pipelines of reclamation systems that operate in the presence of a ground water level slope.

The presented materials are based on the results of personal analytical studies of the main mathematical dependencies, which describe the pressure liquid flow in horizontal collective perforated pipelines, which operate in the presence of the ground water level slope.

System of two differential equations, which describe the liquid 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, is considered. The explored pipeline is laid in the presence of the ground water level slope. By introducing new variables, the original system and its solution is presented in a dimensionless form.

In this case the solution of the system depends on the value of three main factors: the resistance factor of the collecting drainage pipeline " ζ_l "; the generalized parameter "A", which comprehensively takes into account the structural and filtering characteristics of the stream; the ground water level slope «I». The analysis used the concept of an infinitely long drainage pipeline, which operates in the presence of the ground water level slope, or, what is the same, an inclined pipeline with an infinite filtering capacity of the side surface walls. Relatively simple and easy-to-use analytical dependencies were obtained on the basis of the conducted

analysis. They allow to calculate the nature of the flow rate variations and pressure drop along the length.

Corresponding graphic dependencies were constructed to simplify the calculations. It is shown that the value of the geometric slope of the ground water level, along with the resistance factor and the generalized parameter, significantly affects the calculated parameters of such pipelines.

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