

ОЦІНКА ВПЛИВУ РІЗНОГО РОДУ ВТРАТ НАПОРУ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РОБОТИ ЗБІРНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

Олександр Кравчук¹, Ольга Кравчук²

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури
31, пр. Повітрофлотський, м. Київ, Україна, 03037

² Національний транспортний університет
1, вул. М. Омеляновича-Павленка, м. Київ, Україна, 01010

¹ канд. тех. наук, доцент, kravchuk.oa2@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-6578-8896>

² ст. викладач, olgakravchuk56@gmail.com, orcid.org/0000-0003-2616-5455

DOI: 10.32347/2524-0021.2020.34.19-24

Анотація. На основі раніше отриманих авторами розв'язків системи диференціальних рівнянь, які описують рух рідини зі змінною витратою вздовж шляху, розроблена класифікація таких труб, що базується на оцінці величини похибки, яка вноситься в розрахунки витрати в кінці збірної перфорованої трубопроводу при нехтуванні втратами напіору на гідравлічне тертя і втратами, пов'язаними з ефектом зміни витрати. У відповідності з запропонованою класифікацією всі збірні трубопроводи умовно поділяються на: короткі, при розрахунку яких не перевищуючи задану попередньо точність розрахунку, нехтують втратами напіору на гідравлічне тертя; трубопроводи проміжної довжини, коли в розрахунках необхідно враховувати втрати напіору за довжиною і на зміну витрати; довгі – коли втрати напіору, які пов'язані з ефектом зміни витрати, можна не враховувати. Отримано відповідні аналітичні залежності і графіки.

Ключові слова: короткі збірні перфоровані трубопроводи; довгі збірні перфоровані трубопроводи; змінна витрата рідини; напір; коефіцієнт опору, скважність.

ВСТУП

В багатьох областях техніки використовуються перфоровані трубопроводи, які працюють зі змінною витратою вздовж шляху. В залежності від специфіки роботи до них в першу чергу відносять збірні трубопроводи очисних споруд систем водопостачання і водовідведення населених пунктів і виробничих підприємств [1, 2]. Розробка і вдосконалення методик розрахунку параметрів трубопроводів, які зможуть забезпечити технологічно заданий закон збору води в об'ємі очисної споруди дозволить раціональніше використовувати досить обмежені водні ресурси, оптимізувати умови роботи [3, 4] самих трубопроводів і розміри та конструкції споруд, забезпечити

необхідну якість очистки води, що відводиться і споживається, і тим самим зробити суттєвий внесок в справу збереження здоров'я населення, охорони і раціонального використання поверхневих і підземних водних джерел.

Широке застосування збірні канали знаходять також в системах примусової вентиляції. Подача повітря необхідної температури і вологості, а також його відвід з місць великого скупчення людей (театри, концертні і спортивні зали тощо), виробничих приміщень різного призначення створює комфортні умови перебування людей, забезпечує необхідні санітарні умови роботи персоналу і оптимальні режими експлуатації технологічного обладнання [5].

При роботі дренажних систем меліоративного комплексу розглядувані трубопроводи є основними складовими елементами. Відповідно, правильне визначення конструктивних характеристик таких труб дозволить забезпечити надійну роботу всієї системи, створити умови для підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва [6, 7].

МЕТА І МЕТОДИ

В загальному випадку при русі рідини в такому трубопроводі виникають втрати енергії (напору) двох видів. Втрати, які пов'язані з ефектом взаємодії основного і змінюваного (приєднуваного) потоку і втрати за довжиною трубопроводу [8]. Перші мають визначальне значення у відносно коротких трубопроводах, другі – у відносно довгих. Очевидно, що у збірних трубопроводах проміжної довжини обидва види втрат будуть приблизно одного порядку.

На практиці, одночасне врахування дії втрат напору від зміни витрати рідини вздовж шляху і втрат напору за довжиною каналу представляє досить складну математичну задачу [9]. При нехтуванні одним із видів втрат напору розрахунки відповідних трубопроводів суттєво спрощуються. В представленій роботі на основі проведеного аналізу математичних залежностей, що описують рух у збірних трубопроводах, пропонується їх класифікація, яка дозволяє обґрунтовано вирішувати питання, при яких конструктивних характеристиках даних труб можна користуватися спрощеними методиками їх розрахунку.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОЯСНЕННЯ

Як відомо, рух рідини зі змінною витратою в напірних трубопроводах зазвичай описується системою диференціальних рівнянь: рівнянням руху рідини зі змінною масою (1) і рівнянням витікання рідини через отвір (2)

$$\frac{dh}{dx} + \frac{2}{g\Omega^2} Q \frac{dQ}{dx} + \frac{\lambda_{зб}}{2g\Omega^2 D} Q^2 = 0, \quad (1)$$

$$\frac{dQ}{dx} = \mu_{зб} \alpha_n \sqrt{2gz}, \quad (2)$$

де h , Q – змінні за довжиною п'єзометричний напір і витрата на відстані x від початку труби; l , D , Ω , α_n – відповідно, довжина, діаметр, площа перерізу і площа отворів перфорації на одиниці довжини труби; $\mu_{зб}$, $\lambda_{зб}$ – постійні за довжиною, відповідно, коефіцієнт витрати і гідравлічний коефіцієнт тертя збірного трубопроводу. Інші позначення приведені на схемі роботи збірного трубопроводу (рис. 1).

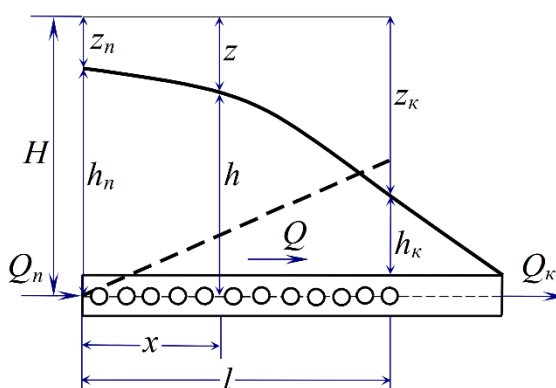


Рис. 1. Схема роботи збірного трубопроводу.
Fig. 1. Scheme of collecting pipeline working.

Як було показано раніше [10], шляхом введення нових безрозмірних змінних

$$\tilde{Q} = \frac{Q}{\Omega \sqrt{2gz_k}}, \quad \tilde{x} = \frac{\mu_{зб} \alpha_n x}{\Omega}, \quad \tilde{z} = \sqrt{\frac{z}{z_k}} \quad (3)$$

і підстановки (2) в (1) вихідна система зводиться до одного нелінійного диференційного рівняння другого порядку

$$-\frac{d\tilde{Q}}{d\tilde{x}} \frac{d^2\tilde{Q}}{d\tilde{x}^2} + 2\tilde{Q} \frac{d\tilde{Q}}{d\tilde{x}} + \frac{\zeta_{l_{зб}}}{2\tilde{f}} \tilde{Q}^2 = 0, \quad (4)$$

де $\tilde{f} = \frac{\mu_{зб} \alpha_n l}{\Omega}$ – скважність збірної труби.

На базі запропонованого приблизного розв'язку рівняння (4) нами отримані основні розрахункові залежності. Так, безрозмірна витрата в довільному перерізі збірника визначається за формулою

$$\tilde{Q} = \frac{1}{k} \frac{sh(k\tilde{x})}{ch(k\tilde{f})}, \quad (5)$$

витрата в кінці трубопроводу буде

$$\tilde{Q}_k = \frac{1}{k} \frac{sh(k\tilde{f})}{ch(k\tilde{f})}. \quad (6)$$

Коефіцієнт k , який входить у розрахункові формули, для кінцевого перерізу слід знаходити як додатній корінь трансцендентного кубічного рівняння, отриманого після підстановки залежності (6) у вихідне диференціальне рівняння (4)

$$-k^3 + 2k + \frac{\zeta_{l_{зб}}}{2f} th(k\tilde{f}) = 0, \quad (7)$$

де $\zeta_{l_{зб}} = \lambda_{зб} \frac{l}{D}$ – коефіцієнт опору збирного трубопроводу.

Значення коефіцієнта k , в загальному випадку рекомендується знаходити підбором або з використанням допоміжних графіків на рис. 2 [11].

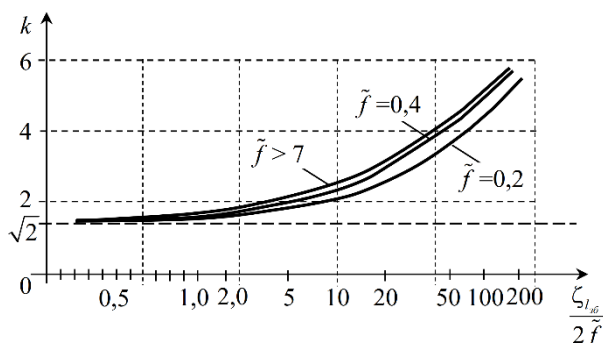


Рис. 2. Графік для визначення коренів рівняння (7).

Fig. 2. Graph for determining the roots of the equation (7).

Для спрощення розрахунків коротких трубопроводів зазвичай нехтують третім членом в рівняннях (4), (7) [12]. При цьому коефіцієнт $k_{кор} = \sqrt{2}$. Для довгих трубопроводів, як правило, $k\tilde{f} > 3$ і $th(k\tilde{f}) \rightarrow 1$. Тоді, при нехтуванні другим членом, в цих рівняннях отримаємо

$$k_{дов} = 3 \sqrt[3]{\frac{\zeta_{l_{зб}}}{2\tilde{f}}}.$$

Очевидно, що при нехтуванні одним із видів втрат напору нехтують в кінцевий результат розрахунків свідомо вводиться певна технічно допустима похибка δ .

Оцінку впливу кожного виду втрат напору на основний потік будемо здійснювати за величиною відносної витрати в кінцевому перерізі збірника. Вважаємо, що втратами напору на гідравлічне тертя можна знехтувати, коли витрата в кінці труби, яка підрахована при цьому, відрізняється від кінцевої витрати, яка підрахована з їх врахуванням, будуть відрізнятися між собою на величину прийнятої похибки розрахунків δ . Тобто справедливе співвідношення

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{Q}_{к.кор}}{\tilde{Q}_k} = 1 + \delta &= \frac{\frac{1}{k_{кор}} th(k_{кор}\tilde{f})}{\frac{1}{k} th(k\tilde{f})} = \\ &= \frac{\frac{1}{\sqrt{2}} th(\sqrt{2}\tilde{f})}{\frac{1}{k} th(k\tilde{f})}. \end{aligned} \quad (8)$$

Прийнявши $th(\sqrt{2}\tilde{f}) \approx th(k\tilde{f})$, з (8) отримаємо

$$k \approx \sqrt{2}(1 + \delta). \quad (9)$$

Підставивши (9) в рівняння (7), дістанемо його у вигляді

$$\begin{aligned} -\sqrt{2}^3(1 + \delta)^3 + 2\sqrt{2}(1 + \delta) + \\ + \frac{\zeta_{l_{зб}}}{2\tilde{f}} th[\sqrt{2}(1 + \delta)\tilde{f}] = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

З останнього виразу знаходимо верхню границю, при якій, не перевищуючи допустиму похибку розрахунку δ , втрати енергії на гідравлічне тертя можна не враховувати:

$$\frac{\zeta_{l_{зб}}}{2\tilde{f}} \leq \frac{2\sqrt{2}\delta(1 + \delta)(2 + \delta)}{th[\sqrt{2}(1 + \delta)\tilde{f}]}, \quad (11)$$

або

$$\zeta_{l_{зб}} \leq \frac{4\sqrt{2}\tilde{f}\delta(1 + \delta)(2 + \delta)}{th[\sqrt{2}(1 + \delta)\tilde{f}]}. \quad (12)$$

За аналогією з приведеним вважаємо, що втратами напору, які пов'язані з впливом змінної витрати, можна знехтувати, коли справедливе співвідношення

$$\frac{\tilde{Q}_{к.дov}}{\tilde{Q}_к} = 1 + \delta = \frac{\frac{1}{k_{дov}} th(k_{дov} \tilde{f})}{\frac{1}{k} th(k \tilde{f})} = \frac{1}{\sqrt[3]{\frac{\zeta_{l_{зб}}}{2\tilde{f}}}} th\left(\sqrt[3]{\frac{\zeta_{l_{зб}}}{2\tilde{f}}} \tilde{f}\right) \quad (13)$$

Прийнявши $th(k \tilde{f}) \approx th(k_{дov} \tilde{f})$, з (13) отримаємо

$$k \approx \sqrt[3]{\frac{\zeta_{l_{зб}}}{2\tilde{f}}} (1 + \delta). \quad (14)$$

Підставивши (14) в рівняння (7), дістанемо

$$-\frac{\zeta_{l_{зб}}}{2\tilde{f}} (1 + \delta)^3 + 2\sqrt[3]{\frac{\zeta_{l_{зб}}}{2\tilde{f}}} (1 + \delta) + \frac{\zeta_{l_{зб}}}{2\tilde{f}} = 0. \quad (15)$$

З даного виразу визначаємо нижню границю при якій, не перевищуючи задану похибку розрахунку δ , ефект приєднання рідини вздовж шляху можна не враховувати

$$\frac{\zeta_{l_{зб}}}{2\tilde{f}} \geq 2\sqrt{2} \left[\frac{1 + \delta}{(1 + \delta)^3 - 1} \right]^{3/2}, \quad (16)$$

або

$$\zeta_{l_{зб}} \geq 4\sqrt{2}\tilde{f} \left[\frac{1 + \delta}{(1 + \delta)^3 - 1} \right]^{3/2}. \quad (17)$$

На рис. 3 представлено графік, який відображає розглянуту класифікацію збірних трубопроводів (11), (16) в залежності

від показника $\frac{\zeta_{l_{зб}}}{2\tilde{f}}$, який комплексно враховує конструктивні характеристики збірних перфорованих трубопроводів.

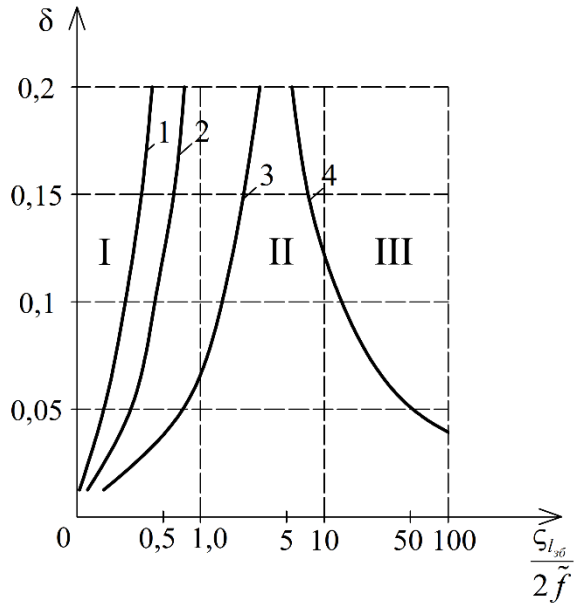


Рис. 3. Графік залежності $\frac{\zeta_{l_{зб}}}{2\tilde{f}}$ збірного трубопроводу від δ : 1 – $\tilde{f} = 1,2$; 2 – $\tilde{f} = 0,5$; 3 – $\tilde{f} = 0,3$; 4 – для всіх \tilde{f} . I – короткі трубопроводи; II – трубопроводи проміжної довжини; III – довгі трубопроводи.

Fig. 3. Graph of the dependencies $\frac{\zeta_{l_{зб}}}{2\tilde{f}}$ for collecting pipeline on δ : 1 – $\tilde{f} = 1,2$; 2 – $\tilde{f} = 0,5$; 3 – $\tilde{f} = 0,3$; 4 – for all \tilde{f} . I – short pipelines; II – intermediate length pipelines; III – long pipelines.

Для практичних розрахунків також важливим є варіант представленої класифікації в залежності від коефіцієнта опору збірного трубопроводу $\zeta_{l_{зб}}$. Відповідний графік залежностей (12), (17) приведено на рис. 4.

Таким чином, у відповідності із запропонованою в даній роботі класифікацією, за величиною коефіцієнта опору всі збірні перфоровані трубопроводи можна розділити на такі групи:

- 1) короткі

$$\zeta_{l_{зб}} \leq \frac{4\sqrt{2}\tilde{f}\delta(1 + \delta)(2 + \delta)}{th[\sqrt{2}(1 + \delta)\tilde{f}]}; \quad (12)$$

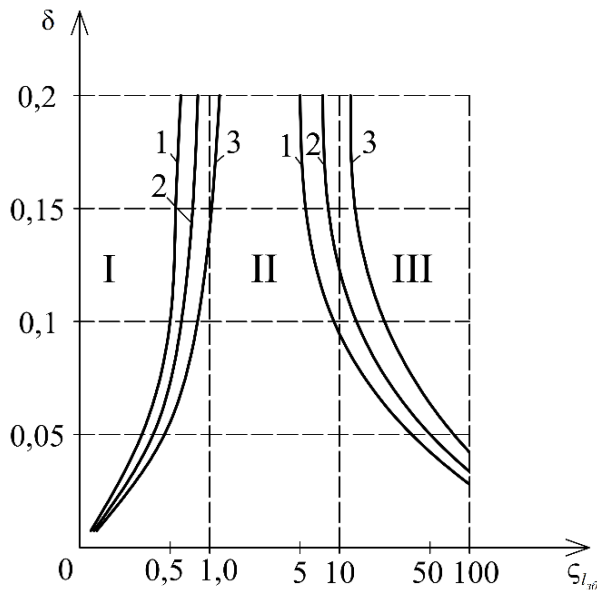


Рис. 4. Графік залежності $\zeta_{l_{зб}}$ збірного трубопроводу від δ : 1 – $\tilde{f} = 0,3$; 2 – $\tilde{f} = 0,5$; 3 – $\tilde{f} = 1,2$. I – короткі трубопроводи; II – трубопроводи проміжної довжини; III – довгі трубопроводи.

Fig. 4. Graph of the dependencies $\zeta_{l_{зб}}$ for collecting pipeline on δ : 1 – $\tilde{f} = 0,3$; 2 – $\tilde{f} = 0,5$; 3 – $\tilde{f} = 1,2$. I – short pipelines; II – intermediate length pipelines; III – long pipelines.

2) проміжної довжини

$$\frac{4\sqrt{2}\tilde{f}\delta(1+\delta)(2+\delta)}{th\left[\sqrt{2}(1+\delta)\tilde{f}\right]} \leq \zeta_{l_{зб}} \leq 4\sqrt{2}\tilde{f}\left[\frac{1+\delta}{(1+\delta)^3-1}\right]^{3/2}; \quad (18)$$

3) довгі

$$\zeta_{l_{зб}} \geq 4\sqrt{2}\tilde{f}\left[\frac{1+\delta}{(1+\delta)^3-1}\right]^{3/2}. \quad (17)$$

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

В роботі на основі отриманих раніше розв'язку системи диференціальних рівнянь, які описують рух рідини в збірних перфорованих трубопроводах, запропо-

новано класифікацію даних труб, що базується на впливі різного роду втрат напору на точність визначення витрати в кінці збірника. Застосування приведеної класифікації дозволить проектувальникам аргументовано використовувати спрощені аналітичні залежності при розрахунку розглядуваних трубопроводів.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Егоров А. И.** Гидравлика напорных трубчатых систем в водопроводных очистных сооружениях. М.: Стройиздат, 1984. 95 с.
2. **Рекомендации** по гидравлическому расчету напорных трубчатых систем для сбора воды в водопроводных очистных сооружениях. / Под общ. ред. В.П. Смирнова. М.: ВНИИВОДГЕО, 1979. 96 с.
3. **Кравчук А. М., Кравчук О. Я.** Аналіз кінематичних характеристик збірних перфорованих трубопроводів. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2016. №26. С. 152 – 160.
4. **Кравчук А. М., Кочетов Г. М., Кравчук О. А.** Проектування трубопроводів для рівномірного збору води вздовж шляху. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2020. №33. С 36-42.
5. **Талиев В. Н.** Аэродинамика вентиляции. М.: Стройиздат, 1975. 295 с.
6. **Рекомендации** по гидравлическому расчету дренажно-коллекторной сети осушительных систем. НТД 33.23.01 – 068 – 86. К.: Минводхоз УССР, Укргипроводхоз, 1986. 34 с.
7. **Руководство** по проектированию осушительных систем в Украинской ССР. НДТ 33.63 – 0.74 – 087. К.: Минводхоз УССР, 1987. 529 с.
8. **Кравчук А. М., Кравчук О. А.** Спеціальні питання гідравліки систем водопостачання і водовідведення: Навч. посібник. Київ: КНУБА, 2020. 175 с.
9. **Петров Г. А.** Гидравлика переменной массы. Харьков: Изд-во Харьковского университета, 1964. 224 с.
10. **Василенко А. А., Кравчук А. М.** Гидравлический расчет перфорированных сборных трубопроводов произвольной длины. Гидравлика и гидротехника, 1986, № 43. С. 70-73.
11. **Василенко А. А., Кравчук А. М.** Гидравлический расчет сборных трубопроводов в сооружениях водоснабжения и

водоотведення. *Гідравліка и гидротехника*, 1991, № 52. С. 57-61.

12. **Смыслов В. В.** К расчету сборных трубопроводов. *Гидравлика и гидротехника*. 1980. № 30. С. 60 – 65.

REFERENCES

1. **Ehorov, A. I. (1984).** *Hydraulics of pressure tubular systems in water treatment plants*. Moscow, USSA: Stroyizdat, 95. [in Russian].

2. **Smirnov, V. P. (Ed.) (1979).** *Recommendations for the hydraulic calculation of pressure tubular systems for water collecting in water treatment plants*. Moscow: VNIIVODGEO, 96. [in Russian].

3. **Kravchuk, A. M., & Kravchuk, O. Y. (2016).** Analysis of kinematic characteristics of collecting perforated pipelines. *Problems of water supply, sewerage and hydraulics*, 26, 152-160. [in Ukrainian].

4. **Kravchuk, A. M., Kochetov, G. M., & Kravchuk, O. A. (2020).** Pipelines designing for steady water collection along the path. *Problems of water supply, sewerage and hydraulics*, 33, 34 – 40. [in Ukrainian].

5. **Taliev, V. N. (1975).** Ventilation aerodynamics. *Moscow, USSA: Stroyizdat*, 295. [in Russian].

6. **State Enterprise «Ministry of Water Resources of the Ukrainian SSR, Ukgiprovdokhoz» (1986).** *Recommendations for hydraulic calculation of drainage-collector network of drainage systems*. NTD 33.23.01 – 068 – 86. Kyiv: Minvodhoz. [in Russian].

7. **State Enterprise «Ministry of Water Resources of the Ukrainian SSR» (1987).** *Guidelines for the drainage systems calculation the Ukrainian SSR*. NTD 33.63 – 0.74 – 087. Kyiv: Minvodhoz. [in Russian].

8. **Kravchuk, A. M., & Kravchuk, O. A. (2020).** *Special issues of hydraulics of water supply and water sewerage systems: Tutorial*. Kyiv, Ukraine: KNUCA, 175. [in Ukrainian].

9. **Petrov, H. A. (1964).** *Variable weight hydraulics*. Kharkiv, Ukraine: Edition of Kharkiv University, 224. [in Russian].

10. **Vasilenko, A. A., & Kravchuk, A. M. (1986).** Hydraulic calculation of perforated collecting pipelines of arbitrary length. *Hydraulics and hydraulic engineering*, 43, 70-73. [in Russian].

11. **Vasilenko, A. A., & Kravchuk, A. M. (1991).** Hydraulic calculation of collecting pipelines in water supply and water sewerage structures. *Hydraulics and hydraulic engineering*, 52, 57-61. [in Russian].

12. **Smyslov, V. V. (1980).** To the calculation of collecting pipelines. *Hydraulics and hydraulic engineering*, 30, 60-65. [in Russian].

Evaluation of the impact of different head loss types on the collecting pipelines working characteristics

Oleksandr Kravchuk, Olga Kravchuk

Abstract. The classification of collecting pipelines is elaborated on the basis of the solutions of the differential equation system, previously obtained by the authors, which describes the fluid motion with variable velocity along the path. It is based on the error value estimation, which is added into discharge calculations at the end of the collecting perforated pipeline while neglecting of head losses on hydraulic friction and losses which are associated with the flow variation effect. In accordance with the proposed classification all collecting pipelines are conditionally divided into: short, in which calculation head losses on hydraulic friction are neglected while the predetermined precision does not exceed; intermediate length pipelines, when it is necessary to take into account the head losses by length and for the discharge variation; long, when the head losses, associated with the discharge variation effect, can be ignored. Appropriate analytical dependencies and graphs are obtained.

Key words: short collecting perforated pipelines; long collecting perforated pipelines; variable fluid discharge; head; resistance coefficient; on-off time ratio.

Стаття надійшла до редакції 21.11.2020