

## ПРОЕКТУВАННЯ ТРУБОПРОВІДІВ ДЛЯ РІВНОМІРНОГО ЗБОРУ ВОДИ ВЗДОВЖ ШЛЯХУ

Андрій Кравчук<sup>1</sup>, Генадій Кочетов<sup>2</sup>, Олександр Кравчук<sup>3</sup>

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

<sup>1</sup>докт. тех. наук, професор, [kravchuk.am@knuba.edu.ua](mailto:kravchuk.am@knuba.edu.ua), [orcid.org/0000-0001-8732-9244](https://orcid.org/0000-0001-8732-9244)

<sup>2</sup>докт. тех. наук, професор, [gkochetov@gmail.com](mailto:gkochetov@gmail.com), [orcid.org/0000-0003-0041-7335](https://orcid.org/0000-0003-0041-7335)

<sup>3</sup>канд. тех. наук, доцент, [kravchuk.oa2@knuba.edu.ua](mailto:kravchuk.oa2@knuba.edu.ua), [orcid.org/0000-0001-6578-8896](https://orcid.org/0000-0001-6578-8896)

DOI: 10.32347/2524-0021.2020.33.34-40

**Анотація.** В даній роботі на основі раніше отриманих авторами аналітичних розв'язків диференціальних рівнянь, які описують рух рідини в напірних перфорованих трубопроводах постійного перерізу, розроблена методика інженерного розрахунку величини змінної за довжиною каналу площі отворів перфорації, що забезпечує рівномірний приток рідини вздовж шляху. Застосування таких труб в очисних спорудах дозволить підвищити ефективність їх роботи. Визначено, що рівномірне надходження рідини за довжиною труби може бути забезпечено тільки нерівномірною перфорацією її стінок. При цьому максимальну перфорацію стінок трубопроводу слід забезпечувати в початкових перерізах каналу, а мінімальну в їх кінці. За приведеними формулами побудовані відповідні графіки. Запропоновані зручні емпіричні залежності для визначення гідравлічного коефіцієнта тертя і коефіцієнта витрати отворів перфорації для розглянутого випадку. Результати розрахунків за запропонованою методикою підтверджені результатами експериментальних досліджень.

**Ключові слова:** перфорація; збірний перфорований трубопровід; скважність; рівномірна витрата вздовж шляху.

### ВСТУП

Для ефективної роботи очисних споруд систем водопостачання та водовідведення в багатьох випадках необхідно забезпечувати певний, технологічно заданий, режим збору і відводу рідини з очисної споруди [1]. Частіше всього це має бути рівномірний режим. Досягнути цього можна різними шляхами.

Як показали дослідження, при рівномірній перфорації стінок збірної труби досягнути повністю рівномірного збору рідини за довжиною споруди неможливо. Мова може йти про певний ступінь рівномірності надходження рідини в

трубу ( $\tau = 0,7 \dots 0,95$ ) [2,3]. Це є допустимим для грубої очистки, при відсутності жорстких вимог до ступеня рівномірності збору. Встановлено, що при скважності бічних стінок труби менше 0,3 можна досягнути практично рівномірного збору. Однак, при цьому суттєво зменшується витрата рідини, яка надходить в трубу і, відповідно, продуктивність очисних споруд.

Іншим способом досягнення рівномірного збору є застосування збірного трубопроводу змінного поперечного перерізу за довжиною. Однак, при його використанні виникають суттєві складнощі при монтажі телескопічного (з діамет-

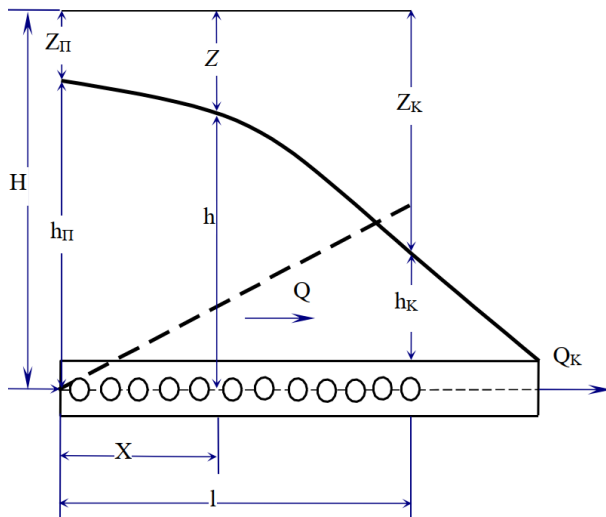
ром, що збільшується за довжиною) трубопроводу.

### МЕТА І МЕТОДИ

Метою роботи є розробка методики інженерного розрахунку змінної за довжиною величини площі отворів перфорації стінок збірних трубопроводу постійного перерізу, яка б забезпечувала рівномірний збір рідини вздовж шляху. Дана методика базується на отриманих нами раніше розв'язках системи диференціальних рівнянь, що описують рух рідини зі змінною витратою в напірних трубопроводах.

### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОЯСНЕННЯ

З нашої точки зору найбільш зручним і надійним способом досягнення повністю рівномірного притоку рідини за довжиною трубопроводу (очисної споруди) може бути прийнятий варіант трубопроводу з постійним діаметром і нерівномірною перфорацією стінок за довжиною [4, 5]. Схема роботи такого трубопроводу приведена на рис. 1.



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

Розглянемо усталений рух нестисливої ньютонівської рідини з витратою, що збільшується вздовж напірного каналу.

Приєднання рідини вважається безперервним через щілини або отвори перфорації, які влаштовані у бічній стінці труби.

Як відомо, для описання руху рідини зі змінною витратою в перфорованих збірних трубопроводах використовується система з двох рівнянь. Диференціальне рівняння руху змінної маси, яке для усталеного руху в каналі постійного перерізу ( $\Omega = \text{const}$  і  $Q = V\Omega$ ) приймає вигляд [6].

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

Другим рівнянням слугує рівняння балансу витрат, яке представляє рівняння витікання рідини через малий отвір. Конкретний вигляд залежності визначається умовами, в яких працює даний перфорований трубопровід. Так, при турбулентному режимі втікання рідини з навколишнього простору через отвори або щілини перфорації в трубу, зазвичай використовують рівняння [7]

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

де  $\Omega$ ,  $D$  – площа перерізу і діаметр труби;  $\frac{d\omega}{dx}$  – площа отворів перфорації (щілини) на одиниці довжини труби;  $z$  – перепад напорів в навколишньому середовищі і в самій трубі, під дією якого відбувається втікання (витікання) рідини.

Коефіцієнт витрати отворів перфорації  $\mu_{зб}$  і гідравлічний коефіцієнт тертя  $\lambda_{зб}$  вважаються постійними вздовж шляху. Коефіцієнт приєднуваної маси  $m$  при другому члені рівняння (1) приймається рівним нулю [8].

Вважаємо, що рівномірний характер зміни витрати (приєднання рідини) вздовж шляху при відсутності транзитної витрати може бути описаним за допомогою залежності виду [9]

$$Q = Q_{ш.к} \frac{x}{l}, \quad (3)$$

де  $Q_{ш.к}$  – приєднана (шляхова) витрата на всій довжині труби.

Шляхом введення нових змінних

$$\tilde{Q} = \frac{Q}{\Omega \sqrt{2gz_k}}, \quad \tilde{\omega} = \frac{\mu_{зб}\omega}{\Omega},$$

$$\tilde{z} = \sqrt{\frac{H-h}{H-h_k}} = \sqrt{\frac{z}{z_k}}, \quad \tilde{x} = \frac{x}{l}, \quad (4)$$

вихідна система рівнянь (1), (2) зводиться до безрозмірного вигляду

$$-\tilde{z} \frac{d\tilde{z}}{d\tilde{x}} + 2\tilde{Q} \frac{d\tilde{Q}}{d\tilde{x}} + \frac{\zeta_{лзб}}{2f} \tilde{Q}^2 = 0 \quad (5)$$

$$\frac{d\tilde{Q}}{d\tilde{\omega}} = \tilde{z}. \quad (6)$$

Рівняння, яке описує закон рівномірного приєднання за довжиною труби (3), при цьому буде

$$\tilde{Q} = \tilde{Q}_{ш.к} \tilde{x}, \quad (7)$$

де  $\tilde{Q}_{ш.к} = \frac{Q_{ш.к}}{\Omega \sqrt{2gz_k}}$  – відносна шляхова

витрата в кінці збірника.

Підставивши (6) і (7) в (5), отримаємо звичайне нелінійне диференційне рівняння другого порядку, яке описує рух рідини в збірному трубопроводі довільної довжини, який забезпечує рівномірний закон приєднання, маємо

$$-\frac{d^2\tilde{Q}}{d\tilde{\omega}^2} + 2\tilde{Q} + \frac{\zeta_{лзб}}{2} \frac{\tilde{Q}^2}{\tilde{Q}_{ш.к}} = 0. \quad (8)$$

В цьому рівнянні другий член враховує втрати напору, які описують ефект приєднання рідини, третій – втрати напору на гідравлічне тертя за довжиною.

При аналізі рівняння (8), спочатку розглянемо роботу відносно коротких збірників. Тоді, при нехтуванні третім членом в ньому, отримаємо

$$\frac{d^2\tilde{Q}}{d\tilde{\omega}^2} = 2\tilde{Q}. \quad (9)$$

У відповідності з [10], його розв'язком буде

$$\tilde{Q} = C_1 ch(\sqrt{2}\tilde{\omega}) + C_2 sh(\sqrt{2}\tilde{\omega}). \quad (10)$$

При граничних умовах:

- на початку труби  $\tilde{\omega}_n = 0$ ;  $\tilde{Q}_n = 0$ ,

- в кінцевому перерізі  $\tilde{\omega}_к = \tilde{f}$ ;

$$\left(\frac{d\tilde{Q}}{d\tilde{\omega}}\right)_к = \tilde{z}_к = 1.$$

Константи інтегрування будуть:

$$C_1 = 0; \quad C_2 = \frac{1}{\sqrt{2}ch(\sqrt{2}\tilde{f})}.$$

Після підстановки в (10) і нескладних перетворень, остаточно отримаємо

$$\tilde{Q} = \frac{sh(\sqrt{2}\tilde{\omega})}{\sqrt{2}ch(\sqrt{2}\tilde{f})}. \quad (11)$$

Для збірних трубопроводів довільної довжини, при врахуванні третього члена в залежності (8), його розв'язок будемо шукати у вигляді [11, 12]

$$\tilde{Q} = \frac{sh(k\tilde{\omega})}{kch(k\tilde{f})}. \quad (12)$$

Тоді, зміна відносного перепаду напорів за довжиною труби, з урахуванням (6), складе

$$\tilde{z} = \frac{ch(k\tilde{\omega})}{ch(k\tilde{f})}. \quad (13)$$

Відносна витрата в кінці збірника (при  $\tilde{\omega}_к = \tilde{f}$ ) і відносний перепад напорів на його початку, відповідно, будуть

$$\tilde{Q}_к = \frac{1}{k} \frac{sh(k\tilde{f})}{ch(k\tilde{f})} = \frac{1}{k} th(k\tilde{f}), \quad (14)$$

$$\tilde{z}_н = \frac{1}{ch(k\tilde{f})}. \quad (15)$$

Для знаходження залежності, яка описує характер зміни площі отворів перфорації за довжиною збірного трубопроводу, спочатку визначаємо

$$\frac{d\tilde{Q}}{d\tilde{x}} = \frac{ch(k\tilde{\omega})}{ch(k\tilde{f})} \frac{d\tilde{\omega}}{d\tilde{x}}. \quad (16)$$

Значення  $\frac{d\tilde{Q}}{d\tilde{x}}$  знаходимо з (7). З урахуванням (6), після підстановки в (13) і розділення змінних, маємо

$$\tilde{Q}_{u.k} d\tilde{x} = \frac{ch(k\tilde{\omega})}{ch(k\tilde{f})} d\tilde{\omega}. \quad (17)$$

Інтегруючи останнє рівняння при граничних умовах:  $\tilde{x}_n = 0$ ,  $\tilde{\omega}_n = 0$ , після нескладних перетворень, отримуємо залежність для визначення відносної площі отворів перфорації на відстані  $\tilde{x}$  від початку труби

$$\tilde{x} = \frac{sh(k\tilde{\omega})}{sh(k\tilde{f})}. \quad (18)$$

Звідки [13]

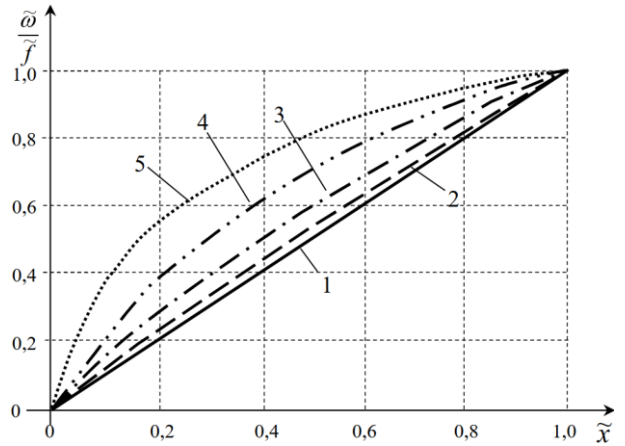
$$\tilde{\omega} = \frac{1}{k} \ln\left(N + \sqrt{N^2 + 1}\right), \quad (19)$$

де  $N = \tilde{x} sh(k\tilde{f})$ .

Для знаходження величини коефіцієнта  $k$ , який входить в розрахункові залежності, підставимо у вихідне рівняння (8) залежність (12) і, з урахуванням (18), після нескладних перетворень, остаточно отримаємо

$$k = \sqrt{2 + \frac{\zeta_{l_{36}}}{2} \tilde{x}}. \quad (20)$$

Для оцінки особливості впливу окремих конструктивних параметрів збірного трубопроводу на інтенсивність притоку розглянемо графіки на рис. 2. Вони відображають характер зміни величини необхідної відносної перфорації бічних стінок  $\frac{\tilde{\omega}}{\tilde{f}}$ , яка буде забезпечувати рівномірний приток за довжиною відносно короткого збірного трубопроводу ( $\zeta_{l_{36}} = 0$ ), при різній величині скважності  $\tilde{f}$ . Для наочності тут же приведена крива 1, яка відображає рівномірну зміну перфорації вздовж труби.



**Рис. 2.** Графік зміни відносної площі перфорації, яка забезпечує рівномірний приток за довжиною відносно короткого збірного трубопроводу:

1 – рівномірна перфорація; 2 –  $\tilde{f} = 0,3$ ; 3 –  $\tilde{f} = 0,6$ ; 4 –  $\tilde{f} = 1,5$ ; 5 –  $\tilde{f} = 2,5$ .

**Fig. 2.** Graph of relative perforation area variation which provides steady inflow along the length of relatively short collecting pipeline:

1 – steady perforation; 2 –  $\tilde{f} = 0,3$ ; 3 –  $\tilde{f} = 0,6$ ; 4 –  $\tilde{f} = 1,5$ ; 5 –  $\tilde{f} = 2,5$ .

Як видно з графіка, при скважності  $\tilde{f} = 0,3$  (крива 2) рівномірний приток забезпечується при практично постійній перфорації. Однак, чим вище скважність (відповідно, криві 3, 4, 5), тим більш нерівномірно повинна бути розміщена перфорація в каналі. Оскільки представлені криві йдуть вгору більш круто в початкових перерізах, то і інтенсивність перфорації тут повинна бути більша і поступово зменшуватися до кінцевого перерізу.

Вказаний характер розподілу перфорації має місце не тільки для коротких збірників, а і для трубопроводів довільної довжини, що мають забезпечувати рівномірний приток рідини за своєю довжиною.

Аналіз кінематичних характеристик збірних перфорованих трубопроводів [14] показав, що на розрахункові характеристики даних труб трубопроводів значний вплив має обґрунтоване визна-

чення величини гідравлічного коефіцієнта тертя  $\lambda_{зб}$  і коефіцієнта витрати отворів перфорації  $\mu_{зб}$ . В загальному випадку ці коефіцієнти змінні по величині за довжиною трубопроводу. Однак, в інженерних розрахунках зручніше використовувати їх постійне значення, що вносить в результати розрахунків незначні похибки, величиною яких зазвичай нехтують.

Авторами даної роботи, на основі проведених експериментальних досліджень, запропоновані досить прості емпіричні залежності для визначення постійних для всього збірника значень цих коефіцієнтів.

Гідравлічний коефіцієнт тертя:

$$\lambda_{зб} = \beta \lambda_0, \quad (21)$$

де  $\lambda_0$  – гідравлічний коефіцієнт тертя для даного трубопроводу при рівномірному русі рідини (визначається за відомими залежностями [15, 16]);  $\beta$  – дослідний поправочний коефіцієнт

$$\beta = 1,62 f^{-0,37}; \quad (22)$$

$f = \frac{al}{\Omega}$  – конструктивний коефіцієнт (відношення площі отворів перфорації до площі поперечного перерізу труби).

Дана залежність рекомендується для використання при  $0,2 \leq f < 1,7$ . У випадку  $f \geq 1,7$ , приймають  $\beta = 1,33$ .

Коефіцієнт витрати отворів (щілин) перфорації:

$$\mu_{зб} = 0,85 - 0,156 f. \quad (23)$$

Ця залежність досить повно описує одержані результати в межах  $0,1 \leq f \leq 2,8$  і  $\delta_* = 0,3-1,4$ , які характерні для реальних водозбірних систем очисних споруд. Тут  $\delta_* = \frac{\delta}{d}$  – відношення товщини стінки труби до діаметра отвору.

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

В роботі на основі отриманих раніше аналітичних розв'язків системи дифере-

нційних рівнянь руху рідини зі змінною витратою розроблена методика інженерного розрахунку площі перфорації стінок трубопроводу, яка б при постійному діаметрі труби забезпечувала рівномірне надходження рідини вздовж збірного каналу. Приведені емпіричні залежності для визначення величини гідравлічного коефіцієнта тертя  $\lambda_{зб}$  і коефіцієнта витрати отворів перфорації  $\mu_{зб}$ , що відповідає параметрам реальних водозбірних систем очисних споруд систем водопостачання і водовідведення.

## ЛІТЕРАТУРА

1. **Большаков В. А., Кравчук А. М.** Визначення параметрів перфорованих трубопроводів, які забезпечують технологічно заданий режим збору рідини. Вісник ТАУ та НТУ, 2000. №4. С. 138-143.
2. **Егоров А. И.** Гидравлика напорных трубчатых систем в водопроводных очистных сооружениях. М.: Стройиздат, 1984. 95 с.
3. **Василенко А. А., Кравчук А. М.** Гидравлический расчет сборных трубопроводов в сооружениях водоснабжения и водоотведения. Гидравлика и гидротехника, 1991. №52. С. 57-61.
4. **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.
5. **Федорец А. А.** Дифференциальные уравнения установившегося движения жидкости в трубопроводах при неравномерном изменении путевого расхода. Изв. вузов. Строительство и архитектура, 1976. №10. С. 114-119.
6. **Петров Г. А.** Гидравлика переменной массы. Харьков: Изд-во Харьковского университета, 1964. 224 с.
7. **Константинов Ю. М., Кравчук А. М.** Спеціальні питання гідравліки систем водопостачання і водовідведення: Навч. посібник. Київ, 1993. 136 с.
8. **Кравчук А. М.** Определение коэффициента присоединяемой массы в перфорированных трубопроводах. Гидравлика и гидротехника, 1988. №46. С. 7-9.
9. **Навоян Х. А.** Гидравлический расчет напорных труб с равномерно изменяющимся

расходом вдоль пути. Научные исследования по гидротехнике в 1973 г. Ленинград, 1976, №3. С. 31-38.

10. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Физматгиз, 1961. 703 с.

11. Василенко А. А., Кравчук А. М. Гидравлический расчет перфорированных сборных трубопроводов произвольной длины. Гидравлика и гидротехника, 1986. №43. С. 70-73.

12. Claudio D. I condotti emungenti da in serbatoio. Contronto fra risultati teorici esperimentali atti e men. Accad. patav. scilettere ed arti 1961 – 1962. №74, Parte 2. P. 188-197.

13. 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.

14. Кравчук А. М., Кравчук О. Я. Аналіз кінематичних характеристик збірних перфорированих трубопроводів. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 2016. №26. С. 152-160.

15. Альтшуль А. Д. Гидравлические сопротивления. М.: Недра, 1970. 216 с.

16. Большаков В. А., Константинов Ю. М., Попов В. Н. и др. Справочник по гидравлике. К.: Вища школа, 1984. 343 с.

#### REFERENCE

1. Bolshakov V. A., & Kravchuk A. M. (2000). Determination of perforated pipelines parameters that provide a technologically defined mode of fluid collection. *Bulletin of TAU and NTU*, 2, 138-143. [in Ukrainian].

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

3. 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].

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

5. Fedorets A. A. (1976). *Differential equations of steady-state fluid motion in pipelines with non-steady flow rate variation*. Izv. Vuzov.

Construction and architecture, 10, 114-119. [in Russian].

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

7. Konstantinov Y. M., & Kravchuk A. M. (1993). *Special issues of hydraulics of water supply and water sewerage systems: Tutorial*. Kyiv, Ukraine, 136. [in Ukrainian].

8. Kravchuk A. M. (1988). Determination of attaching mass coefficient in perforated pipelines. *Hydraulics and hydraulic engineering*, 46, 7-9. [in Russian].

9. Navoyan H. A. (1973). Hydraulic calculation of pressure pipes with uniformly varying flow along the path. *Scientific research in hydraulic engineering in 1973*, 3, 31-38. [in Russian].

10. Kamke E. (1961). *Handbook of ordinary differential equations*. Moscow, USSA: Fizmatgiz, 703. [in Russian].

11. 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].

12. Claudio D. (1962). I condotti emungenti da in serbatoio. Contronto fra risultati teorici esperimentali atti e men. *Accad. patav. scilettere ed arti 1961 – 1962*, 74 (Part 2), 188-197.

13. Dwight G. B. (1977). *Tables of integrals and other mathematical data / Translation from English N.V. Levy edited by K.A. Semendyaev*. Moscow, USSA: Nauka, 228. [in Russian].

14. 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].

15. Altshul A. D. (1970). *Hydraulic resistance*. Moscow, USSA: Nedra, 216. [in Russian].

16. Bolshakov V. A., Konstantinov Y. M., & Popov V. N. (1984). *Hydraulic handbook*. Kyiv, USSA: Vysha shkola, 343. [in Russian].

### **Pipelines designing for steady water collection along the path**

*Andriy Kravchuk, Gennadii Kochetov, Oleksandr Kravchuk*

**Abstract.** The technique of engineering calculation of perforation holes area which is variable along the length of the channel and provides steady fluid inflow along the path is developed in the article. It is based on previously obtained analytical solutions of differential equations describing the fluid motion in pressure perforated pipelines of a constant cross section. The use of such pipes in treatment plants will increase their efficiency. It is determined that the steady fluid inflow along the length of the pipe can be secured only by its non-steady walls perforation. The maximum perforation of the pipeline walls should be ensured at the initial sections of the channel, and the minimum – at their last sections. The corresponding graphs are built according to the formulas. Convenient empirical dependencies for determining the hydraulic friction coefficient and the coefficient of perforation holes discharge for the considered case are proposed. The results of the calculations according to the proposed method are confirmed by the results of experimental studies.

**Key words:** perforation; collecting perforated pipeline; steady discharge along the path.

*Стаття надійшла до редакції 2.4.2020*