

Вдосконалення розрахунку збірних перфорованих трубопроводів для очисних споруд

А. М. Кравчук, Г. М. Кочетов, О. А. Кравчук

Представлені результати експериментальних і теоретичних досліджень характеристик перфорованих трубопроводів, які застосовуються при зборі і відводі води з ємнісних очисних споруд систем водопостачання та водовідведення. Досліджувалась величина і характер зміни коефіцієнта витрати отворів перфорації $\mu_{зб}$ за довжиною трубопроводу в залежності від конструктивних характеристик перфорованих труб і параметрів потоку рідини в трубопроводі. Вимірювання проводились на спеціально змонтованому експериментальному стенді. В досліді визначався характер зміни величини витрати і п'єзометричної лінії вздовж збірника. Отримані дані показали, що коефіцієнт витрати $\mu_{зб}$ є змінним за довжиною збірного каналу. Його величина залежить від співвідношення швидкості струминок рідини, які втікають в трубу, до середньої швидкості потоку в перерізі, що розглядається (U_0/V). При цьому дане співвідношення також змінюється вздовж шляху, воно має максимальне значення на початку труби і мінімальне в її кінці. Змінний за величиною коефіцієнт витрати отворів перфорації навпаки, мав мінімум на початку і максимум в кінці збірника. В результаті аналізу вихідних рівнянь і результатів експериментальних даних показано, що в розрахунках без суттєвої похибки можна приймати значення коефіцієнта витрати отворів перфорації $\mu_{зб}$ постійним за довжиною збірника. Також оцінено вплив транзитної витрати на величину цього коефіцієнта. Показано, що збільшення транзиту призводить до певного збільшення середнього для всього збірника коефіцієнта витрати. Запропоновані зручні для використання емпіричні залежності для розрахунку змінного і постійного за величиною коефіцієнта витрати для випадку наявності і відсутності транзиту в напірному водовідвідному каналі.

Ключові слова: змінна витрата, збірний перфорований трубопровід, коефіцієнт витрати отворів перфорації, скважність.

1. Вступ

При підготовці води для питних і виробничих потреб, а також очистці відпрацьованих стічних вод широко використовуються ємнісні очисні споруди у вигляді резервуарів різної конструкції і форми. Ефективність і якість очистки при цьому суттєво залежить від характеру розподілу і збору води в цій споруді. Частіше всього збір води і робота всієї очисної споруди здійснюється в рівномірному режимі. Для забезпечення рівномірного (або за певним законом) відводу води з об'єму очисних споруд, зазвичай використовують трубопроводи і канали з перфорованими стінками [1–3]. При цьому частіше всього перфорація виконується у вигляді отворів або щілин [4]. Гідравлічний розрахунок таких трубопро-

водів представляє досить складну інженерну задачу. Отримання достовірних даних про конструктивні і гідравлічні характеристики збірних каналів, а також дослідження в цьому напрямку є важливими і актуальними. Від надійної роботи розглядуваних систем у великій мірі залежить ефективність роботи очисних споруд в цілому. Їх якісна робота повинна забезпечити необхідну степінь очистки природних і стічних вод.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Одним з важливих параметрів, від правильного знаходження якого залежить точність отриманого кінцевого результату розрахунку, є величина коефіцієнта витрати отворів перфорації. Визначенню залежностей для його розрахунку присвячено велику кількість експериментальних досліджень [5–7]. При цьому розглядається варіант витікання рідини в атмосферу або під рівень рідини, яка знаходиться в стані спокою.

Для цього випадку закономірності зміни коефіцієнта витрати з малого отвору μ_o досить добре вивчені. Так, за даними [8], коефіцієнт витрати μ_o при витіканні важкої нестисливої рідини з постійною в'язкістю (має місце при роботі санітарно технічних систем) через малий отвір в резервуарі великих розмірів, в загальному випадку, визначається функціональною залежністю

$$\mu_o = \psi(\text{Re}_o; \text{Eu}_o; \text{Fr}_o; \text{We}_o), \quad (1)$$

В даному співвідношенні відповідні критерії підраховано за значеннями гідравлічних параметрів в отворах.

На основі обробки великої кількості експериментального матеріалу показано, що в більшості практичних випадків (коли $\text{Fr}_o > 10$ і $\text{We}_o > 2500$), при витіканні з отвору має місце автомодельність відносно чисел Fr_o і We_o . Коефіцієнт μ_o в цьому випадку можна розглядати як величину пропорційну Eu_o , тоді з (1) отримаємо

$$\mu_o = \psi(\text{Re}_o). \quad (2)$$

Для ламінарного і турбулентного режиму руху рідини через отвір, для визначення коефіцієнта μ_o в цьому випадку запропоновані відомі формули.

Як показано в роботі [4], на характер витікання рідини, а відповідно, і на величину коефіцієнта витрати, також суттєво впливає форма отвору і співвідношення його гідравлічного радіусу R (або діаметра отвору d_o) до товщини стінки $r^* = \delta/R$ або ($\delta^* = \delta/d_o$).

Значно складніша картина витікання рідини через отвори має місце при роботі перфорованих трубопроводів в режимі збору [9, 10]. При цьому складова швидкості руху в площині отвору стає відмінною від нуля. Тобто, у випадку збору води, її втікання через отвори в боковій стінці труби відбувається в потік, що рухається всередині і зносить втікаючу струминку.

Проведений аналіз показав, що при рівномірній перфорації бічних стінок каналу, в збірному перфорованому трубопроводі має місце нерівномірний режим руху рідини вздовж шляху. Характер цієї нерівномірності визначається величиною співвідношення між швидкістю руху приєднаних (втікаючих) струминок і середньою в даному перерізі швидкістю основного потоку в каналі (U_o/V) [11, 12].

Таким чином, на величину коефіцієнта витрати $\mu_{зб}$, окрім числа Re приєднаного і основного потоків, суттєво впливає їх співвідношення (U_o/V). Причому, в загальному випадку дане співвідношення також змінюється за довжиною збірних каналів. Тоді, функціональна залежність (1) прийме вигляд

$$\mu = \psi \left(Re; Re_o; \frac{U_o}{V}; \frac{\delta}{d_o} \right). \quad (3)$$

Для визначення конкретної форми залежності (3) для збірних трубопроводів була розглянута велика кількість робіт, наприклад [13–15]. В них відмічається, що з ростом відношення (U_o/V) від 0 до ∞ , коефіцієнт $\mu_{зб}$ змінюється від нуля і асимптотично наближається до значення коефіцієнта витрати одиночного отвору μ_o . В окремих випадках показано, що при зростанні (U_o/V) від нуля до одиниці, коефіцієнт витрати в збірному трубопроводі може навіть перевищувати його значення для одиночного отвору, тобто $\mu_{зб}/\mu_o > 1$. При цьому вказується, що при $U_o/V > 3$ в потоці має місце автотельність значення коефіцієнта $\mu_{зб}$ від цього параметра.

Існуючі дані експериментальних досліджень відносяться до конкретних характеристик і умов роботи збірних трубопроводів, і їх важко використовувати в інших умовах. При цьому узагальнюючі розрахункові залежності для визначення змінного за довжиною коефіцієнта витрати отворів перфорації $\mu_{зб}$ є досить наближеними і потребують додаткового корегування і дослідження. Їх використання не дозволяє розрахувати величину вказаного коефіцієнта в залежності від конструктивних характеристик перфорованих трубопроводів, зокрема скважності труби. Також недоліком запропонованих розрахункових залежностей є те, що в них не враховано особливості руху рідини в каналах зі змінною витратою вздовж шляху.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є встановлення залежності величини змінного за довжиною збірного трубопроводу коефіцієнта витрати отворів перфорації $\mu_{зб}$ від конструктивних характеристик труб та оцінка впливу на нього співвідношення швидкостей втікання рідини через отвір до середньої швидкості потоку в розглядуваному перерізі каналу $\mu_{зб} = f(U_o/V)$. Це дасть можливість розробити надійну методику розрахунку збірних перфорованих трубопроводів.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- провести необхідні теоретичні і експериментальні дослідження по визначенню характеристик роботи збірних трубопроводів, які працюють з приєднанням витрати вздовж шляху;
- в результаті обробки отриманих результатів встановити відповідні розрахункові формули для визначення коефіцієнта витрати $\mu_{зб}$ в перфорованих збірних трубопроводах;
- оцінити вплив транзитної витрати на параметри потоку.

4. Матеріали та методи досліджень коефіцієнта витрати отворів перфорації збірника

При проведенні досліджень комплексно застосовувались методи експериментальних вимірювань і аналітичної обробки отриманих дослідних даних, які доповнювались результатами розв'язку вихідних теоретичних залежностей, за допомогою яких описують рух рідини зі змінною витратою в напірних збірних трубопроводах.

Експериментальна частина роботи проводилась на спеціально підготовленому аеродинамічному стенді, схема якого приведена на рис.1. Робочою рідиною при цьому служило повітря.

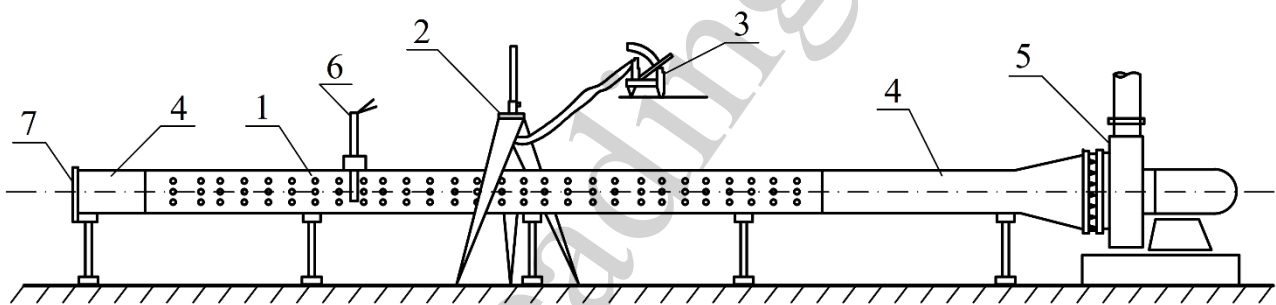


Рис. 1. Схема аеродинамічної експериментальної установки: 1 – досліджуваний трубопровід; 2 – координатник з вимірювальною трубкою; 3 – мікроманометр; 4 – суцільна ділянка труби; 5 – вентилятор з електродвигуном; 6 – тензOMETРИЧНИЙ датчик; 7 – заглушка

Як основний дослідний зразок використовувався сталевий трубопровід $D=159 \times 4,5$ мм, загальною довжиною $L=4,0$ м. При цьому довжина робочої перфорованої частини складала $l=3,0$ м. Перфорація в трубі улаштовувалась у вигляді отворів діаметром $d_o=0,003$ м, з кроком $\Delta l=0,03$ м, по 8 отворів в кожному поперечному перерізі (всього 800 отворів). В процесі роботи діаметр отворів збільшувався (спочатку $d_o=0,006$ м, потім $d_o=0,009$ м). Отвори розміщувались по твірній трубопроводу перпендикулярно його повздовжній вісі. Відносна довжина змінювалась від $(l/D)_{\min}=6,6$ до $(l/D)_{\max}=20$. Зміна конструктивного параметра $f=\alpha_n l / \Omega$ становила від 0,3 до 2,8. Вимірювання профілю осереднених швидкостей і характеру п'єзометричної лінії здійснювались в 10 спеціально обладнаних створах, розташованих через 0,5 і 0,25 м.

В експериментальних дослідженнях використаний перфорований трубопровід за своїми конструктивними характеристиками, зокрема діаметром, довжиною, характером перфорації відповідав характеристикам трубопроводів, які застосовуються в реальних очисних спорудах. При роботі даних трубопроводів на моделі і в натурі зберігався турбулентний режим руху рідини, як при русі основного потоку в трубі, так і при її втіканні через отвори перфорації. Число Рейнольдса, в залежності від умов роботи, при цьому знаходилось в межах 10000–120000. Тобто, гідравлічні умови роботи трубопроводів на моделі і в натурі були однакові.

Тиск і розрідження в робочому трубопроводі забезпечувались центробіжним вентилятором, який був встановлений на нерухомий монолітний фундамент. В залежності від особливостей експерименту, кінець трубопроводу міг бути або заглушеним, або відкритим. При вимірюваннях використовувалось відповідне робоче і вимірювальне обладнання та апаратура. Методики обробки отриманих результатів дослідів відповідали поставленим задачам.

5. Результати досліджень залежності коефіцієнта витрати отворів перфорації від конструктивних характеристик збірного трубопроводу

5. 1. Результати експериментальних і теоретичних досліджень

Результати вимірювання зміни характеристик U_o/V (відношення швидкості втікання струминки в отвір U_o до середньої швидкості потоку у відповідному перерізі труби V) і $U_{o.c}/V_k$ (відношення середньої для всієї труби швидкості втікання рідини до середньої швидкості потоку в кінцевому переріз цієї труби) в залежності від співвідношення $x' = \alpha_n x / \Omega$ (або $f = \alpha_n l / \Omega$) приведені на рис. 2. Тут $\alpha_n = \sum \omega_o / l$ – площа отворів перфорації на одиниці довжини труби.

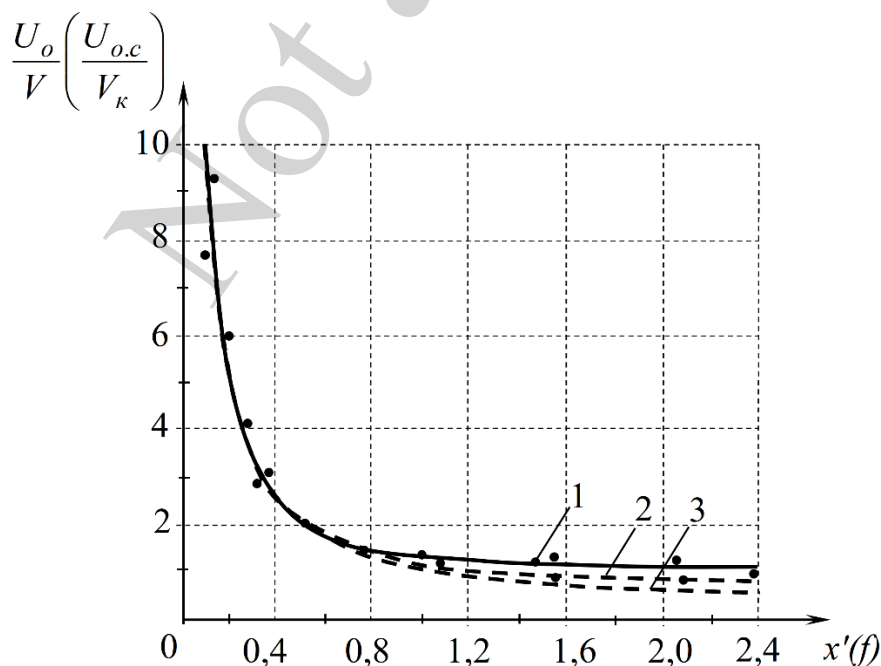


Рис. 2. Зміна відношення швидкості приєднаних мас рідини до середньої швидкості в перерізі

На приведеному графіку крива 1 (позначення – •) характеризує зміну даного співвідношення за довжиною трубопроводу при різних значеннях конструктивного параметра f у випадку використання змінних вздовж шляху значень коефіцієнта витрати отворів перфорації $\mu_{зб}$. Крива 2 відповідає випадку використання в розрахунках значень коефіцієнта витрати постійних для даної конкретної величини параметра $f(\mu_{зб,c})$. Крива 3 відображає зміну відношення середньої швидкості притоку для всього збірника до середньої швидкості в його кінцевому перерізі ($U_{o,c}/V_k$) при тих же величинах f .

З наведених графіків видно, що між трьома приведеними кривими існує досить гарне співпадіння. Особливо це має місце в тих межах конструктивних характеристик збірників ($0,4 < f < 1,0$), в яких вони знаходять найширше застосування на практиці. Дана обставина свідчить про те, що при розрахунку конструктивних і гідравлічних характеристик збірних трубопроводів також можна користуватися осередненими для даного каналу параметрами і, що це, в межах допустимої похибки, буде відповідати реальній картині руху рідини з витратою, яка збільшується вздовж шляху.

Для розуміння характеру зміни характеристик у збірних трубопроводах корисним є графік на рис. 3, на якому відображено зміну співвідношення числа Рейнольдса в отворі перфорації до числа Рейнольдса, яке підраховане за середньою швидкістю у відповідному перерізі $\frac{Re_o}{Re} = \frac{U_o d_o / \nu}{VD / \nu}$ в залежності від діаметра отворів перфорації d_o .

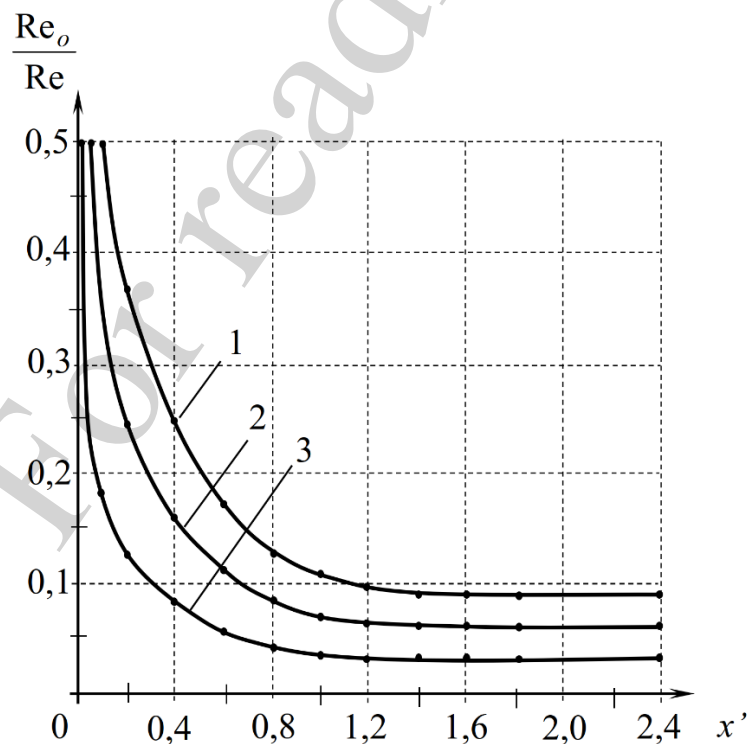


Рис. 3. Графіки зміни співвідношення Re_o/Re за довжиною збірника: 1 – $d_o=0,003$ м; 2 – $d_o=0,006$ м; 3 – $d_o=0,009$ м

Отримані графічні залежності показують, що при турбулентному режимі руху рідини в отворах перфорації і в перерізах збірному трубопроводу найбільше значення співвідношень U_o/V і Re_o/Re має місце на початкових ділянках збірних труб і поступово зменшується до кінця трубопроводу. Така ж тенденція має місце і відносно викривлення поля осереднених швидкостей. Також можна зробити висновок, що співвідношення U_o/V , $U_{o,c}/V_k$ і Re_o/Re більші у трубопроводах, які мають менше значення конструктивного параметра f . При збільшенні f ці величини будуть зменшуватися.

Залежність величини змінного за довжиною коефіцієнта витрати від розглянутих співвідношень швидкостей приведена на рис. 4.

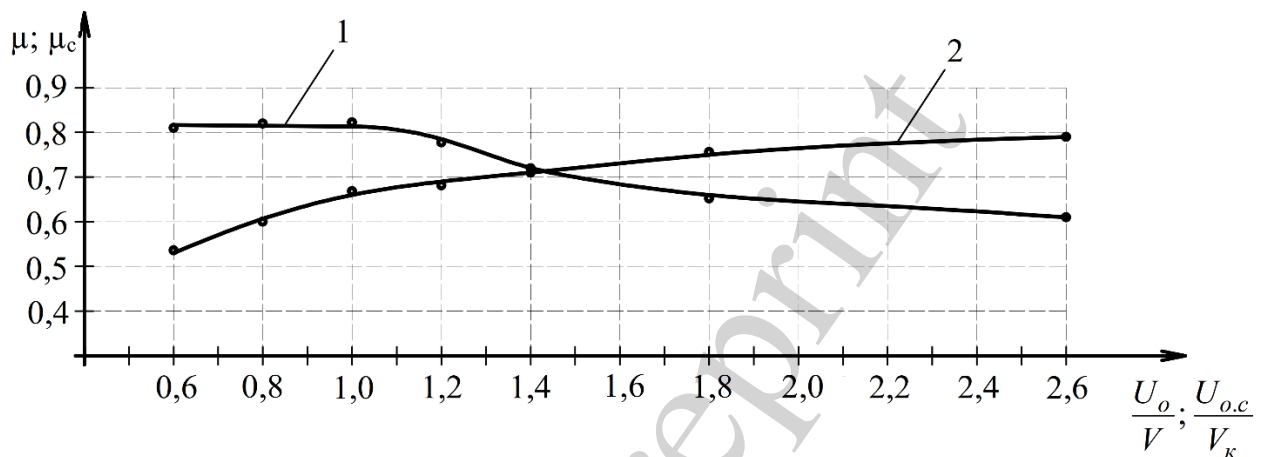


Рис. 4. Залежність коефіцієнта витрати від розглянутих співвідношень швидкостей: 1 – змінне за довжиною значення витрати (U_o/V); 2 – постійне за довжиною значення витрати ($U_{o,c}/V_k$)

При розрахунках збірних перфорованих трубопроводів важливим є можливість аналітичного розрахунку розглядуваних співвідношень швидкостей U_o/V , $U_{o,c}/V_k$ в залежності від конструктивних характеристик труб. Використаємо для цього запропонований [16] підхід, згідно з яким схема роботи досліджуваного збірного трубопроводу має вигляд (рис. 5).

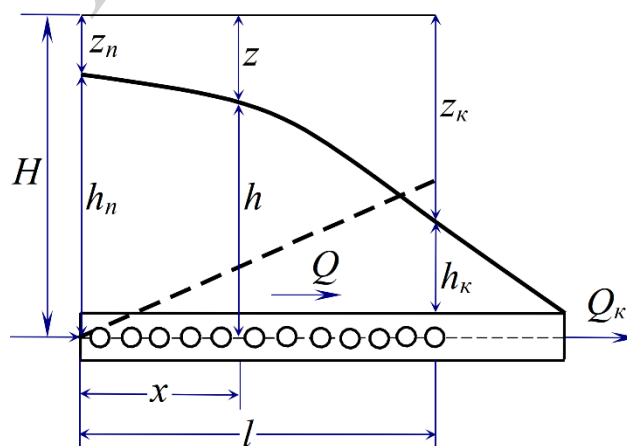


Рис. 5. Схема роботи збірного трубопроводу

Як показано в багатьох роботах, наприклад [14, 17] рух рідини зі змінною витратою в перфорованих трубопроводах описується системою диференціальних рівнянь, а саме рівняння гідравліки змінної маси і рівняння витікання через отвір

$$\frac{dh}{dx} + \frac{A}{g\Omega^2} Q \frac{dQ}{dx} + \frac{\lambda_{зб}}{2g\Omega^2 D} Q^2 = 0, \quad (4)$$

$$\frac{dQ}{dx} = \mu_{зб} \alpha_n \sqrt{2gz}, \quad (5)$$

де $\mu_{зб}$, $\lambda_{зб}$ – відповідно, коефіцієнт витрати і гідравлічний коефіцієнт тертя збір-ного трубопроводу (приймаються постійними за довжиною); A – параметр, який для даних труб приймається рівним 2; D , Ω – діаметр і площа поперечного перерізу трубопроводу. Інші позначення приведені на рис. 5.

Розв'язок вихідної системи диференціальних рівнянь (4), (5) має вигляд:

– відносна витрата в кінці збірника

$$\bar{Q}_к = \frac{1}{k} \text{th}(k\bar{f}); \quad (6)$$

– відносна витрата в довільному перерізі

$$\bar{Q} = \frac{1}{k} \frac{\text{sh}(k\bar{x})}{\text{ch}(k\bar{f})}; \quad (7)$$

– відносний перепад напорів в цьому ж перерізі

$$\bar{z} = \frac{\text{ch}(k\bar{x})}{\text{ch}(k\bar{f})}. \quad (8)$$

Зважаючи на те, що $U_o = \mu_{зб} \sqrt{2gz}$ і $V = Q/\Omega$, а також використав нові змінні:

$$\bar{Q} = \frac{Q}{\Omega \sqrt{2gz_к}}, \quad \bar{x} = \frac{\mu_{зб} \alpha_n x}{\Omega}, \quad \bar{z} = \sqrt{\frac{z}{z_к}}, \quad (9)$$

після нескладних перетворень, отримаємо:

$$\frac{U_o}{V} = \frac{\mu_{зб} \sqrt{2gz}}{\bar{Q} \sqrt{2gz_к}} = \frac{\mu_{зб} \bar{z}}{\bar{Q}} = \mu_{зб} \frac{\text{ch}(k\bar{x})/\text{ch}(k\bar{f})}{\text{sh}(k\bar{x})/k \cdot \text{ch}(k\bar{f})} = \frac{\mu_{зб} k}{\text{th}(k\bar{x})}, \quad (10)$$

$$\frac{U_{o.c}}{V_k} = \frac{\mu_{зб.с} \bar{z}_n + 1}{2 \bar{Q}_k} = \frac{k\mu_{зб.с} \operatorname{ch}(k\bar{f}) + 1}{2 \operatorname{sh}(k\bar{f})}. \quad (11)$$

де $\bar{f} = \mu_{зб} \alpha_{п} l / \Omega$ – скважність трубопроводу.

Значення коефіцієнта k слід знаходити за графіком приведеним в роботі [18].

Для відносно коротких збірних трубопроводів ($\zeta_{l=\lambda/D} < 2$) коефіцієнт $k = \sqrt{2}$. Тоді співвідношення (10), (11) приймуть вигляд

$$\frac{U_o}{V} = \frac{\mu_{зб} \sqrt{2}}{\operatorname{th}(\sqrt{2}\bar{x})}, \quad (12)$$

$$\frac{U_{o.c}}{V_k} = \frac{\mu_{зб.с} \operatorname{ch}(\sqrt{2}\bar{f}) + 1}{\sqrt{2} \operatorname{sh}(\sqrt{2}\bar{f})}. \quad (13)$$

На рис. 6 приведені дані для збірника, який працює без транзиту.

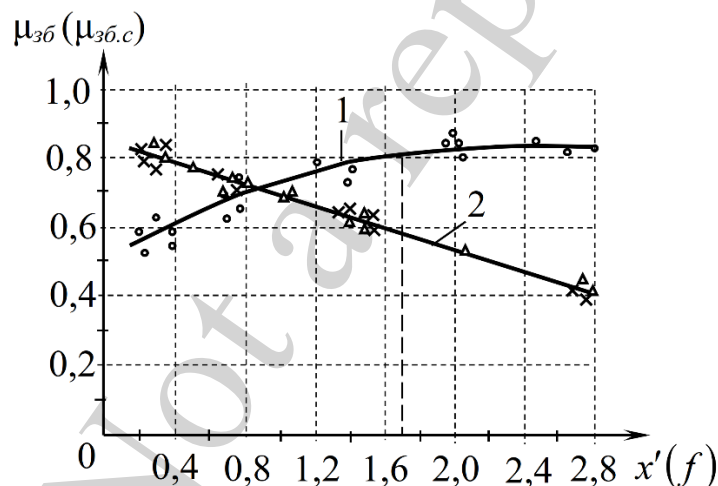


Рис. 6. Графіки по визначенню коефіцієнта витрати збірних трубопроводів: 1 – значення змінні за довжиною каналу; 2 – значення осереднені для всієї труби

5. 2. Результати обробки експериментальних даних по визначенню коефіцієнта витрати отворів перфорації $\mu_{зб}$

На основі обробки результатів власних експериментів, а також даних і аналізу існуючих дослідів, запропоновано емпіричні залежності для визначення коефіцієнта витрати збірного трубопроводу, який працює без транзиту:

– змінне за довжиною значення у збірника

$$\mu_{зб.с} = 0.72x^{0,17}; \quad (14)$$

– осереднене за довжиною цього ж трубопроводу

$$\mu_{зб.с} = 0.85 - 0,156f. \quad (15)$$

5. 3. Оцінка впливу транзитного потоку на умови роботи збірних трубопроводів

При проведенні експериментів також досліджувався вплив транзитного потоку на основні кінематичні характеристики потоків у збірних трубопроводах. Для збірників за транзитну приймалася витрата на початку перфорованої частини трубопроводу. Її величина регулювалася заслонкою, встановленою в початковому перерізі.

На рис. 7 показано характер зміни співвідношення відносної шляхової витрати, яка приєднується на всій довжині труби, до відносної витрати в її кінцевому перерізі ($\bar{Q}_{ш}/\bar{Q}_к$) в залежності від скважності \bar{f} при пропуску транзитної витрати $\bar{Q}_{тр}$.

Верхня пряма відповідає випадку відсутності транзитної витрати ($\bar{Q}_{тр} = 0$). При цьому витрата в кінцевому перерізі буде дорівнювати шляховій. Збільшення транзитної витрати призводить до збільшення сумарної витрати в кінці труби, але доля приєднуваної витрати при цьому зменшується.

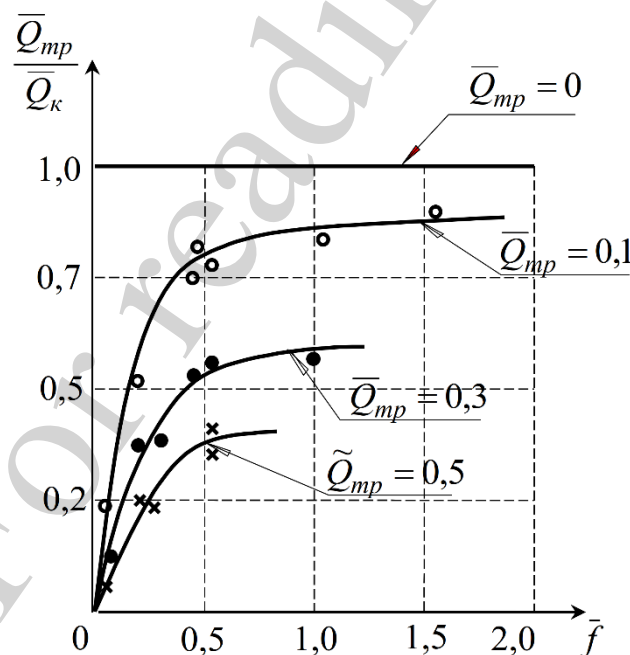


Рис. 7. Графік зміни відносної шляхової витрати в кінці труби в залежності від \bar{f} і $\bar{Q}_{тр}$, \circ , \bullet , \times – дослідні дані

Емпірична залежність для визначення середнього для всього збірника значення коефіцієнта витрати при наявності транзиту має вигляд

$$\mu_{зб.с} = 0,85 - 0,156f \left(1 - \frac{Q_{тр}}{Q_{к}} \right)^{0,5} + 0,12 \frac{Q_{тр}}{Q_{к}}. \quad (16)$$

Вона показує, що наявність транзитної витрати в перерізі збірного трубопроводу суттєво впливає на величину коефіцієнта витрати отворів перфорації і її обов'язково необхідно враховувати в розрахунках.

6. Обговорення результатів дослідження впливу характеристик збірних трубопроводів на коефіцієнт витрати отворів перфорації

Отримані в даній роботі розрахункові залежності (14)–(16) досить повно описують одержані експериментальні результати в межах, $0,1 < f < 2,8$ і $\delta_* = 0,3–1,4$, що відповідають параметрам реальних водозбірних систем очисних споруд систем водопостачання і водовідведення.

Підтверджено суттєве збільшення значення коефіцієнта витрати при зборі рідини, в порівнянні з його величиною для одиночного отвору, що пояснюється наявністю певного ефекту ежекції, який створюється за рахунок взаємодії основного потоку в каналі і втікаючої через отвір перфорації струмини.

Як було визначено вище, для інженерних розрахунків розглядуваних трубопроводів найбільш простими і зручними в користуванні можна вважати залежності, в яких значення коефіцієнта витрати $\mu_{зб.с}$ приймаються постійними за довжиною збірника і визначається в залежності від його конструктивних характеристик (15), (16).

У збірних трубопроводах при пропуску транзитної витрати, в створі перед перфорованою частиною, епюри осереднених швидкостей мають стандартний характер, як при рівномірному русі. Під впливом втікаючих струминок поле осереднених швидкостей поступово деформується вздовж перфорованої частини. Інтенсивність цієї трансформації залежить від співвідношення між транзитною і шляховою витратами ($Q_{тр}/Q_{ш}$), а також від величини конструктивного параметра f . Меншим значенням вказаних величин відповідає активніша перебудова швидкісного поля у відповідних перерізах. Збільшення транзитної витрати викликає деяке підвищення значень коефіцієнта витрати. Дану обставину можна пояснити посиленням впливом ефекту ежекції від транзитного потоку на приєднувану частину витрати.

Вказані результати досліджень, отримані за рахунок вивчення гідродинамічної структури потоку всередині збірних перфорованих трубопроводів, охоплюють більш широкий діапазон зміни їх конструктивних характеристик. Так, величина конструктивного коефіцієнта перфорованого трубопроводу змінювалась в межах $0,1 < f < 2,8$, при цьому відношення товщини стінки труби до діаметра отвору перфорації становило $\delta_* = 0,3–1,4$. Вказані характеристики розглядуваних труб відповідають діючим нормам і використовуються в практиці проектування та експлуатації водозбірних систем.

До напрямків подальших досліджень слід віднести питання розрахунку параметрів вказаних трубопроводів при наявності нерівномірної перфорації стінок і змінного поперечного перерізу за довжиною каналу. Безумовно важливим

для розуміння особливостей руху рідини зі змінною витратою є питання дослідження пульсаційних характеристик даних течій.

7. Висновки

1. В результаті проведених досліджень здійснена оцінка отриманих результатів аналітичного розв'язку вихідних диференціальних рівнянь, які описують рух рідини в збірних трубопроводах, що працюють зі змінною витратою вздовж шляху. Показано, що використання в розрахунках запропонованих аналітичних залежностей і застосування в них відповідних емпіричних формул дозволяє отримати їх досить гарне співпадіння (до 5 %).

2. На основі проведених експериментальних досліджень запропоновано відносно прості і зручні для використання емпіричні формули для визначення коефіцієнта витрати отворів перфорації в залежності від співвідношення швидкостей приєднуваного і основного потоків. Встановлено, що величина змінного за довжиною коефіцієнта витрати отворів перфорації $\mu_{зб}$ збільшується за довжиною трубопроводу, а середнього для всього збірника – зменшується при збільшенні довжини каналу.

3. Оцінено вплив транзитної витрати на величину коефіцієнта витрати $\mu_{зб}$. Встановлено, що збільшення транзитної витрати в межах від 0 до $Q_{тр}/Q_{к}=1$ при зміні скважності від 0,1 до 2,8, призводить до збільшення середнього для всього збірника коефіцієнта витрати отворів перфорації $\mu_{зб,с}$, відповідно, на 16–95 %.

Подяка

Автори вдячні за фінансову підтримку науково-дослідного проекту Київського національного університету будівництва та архітектури 5 ДБ-2018 з виконання наукових досліджень і розробок, які здійснюються за підтримки МОН України.

Література

1. Егоров, А. И. (1984). Гидравлика напорных трубчатых систем в водопроводных очистных сооружениях. М.: Стройиздат, 95. URL: <http://books.totalarch.com/node/6916>
2. Saitov, V., Kotyukov, A. (2019). Water filter with central perforated pipe for livestock complexes. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 403, 012159. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012159>
3. Polyakov, V., Kravchuk, A., Kochetov, G., Kravchuk, O. (2019). Clarification of aqueous suspensions with a high content of suspended solids in rapid sand filters. EUREKA: Physics and Engineering, 1, 28–45. doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00827>
4. Горкин, Н. А. (1964). Коэффициент расхода при сборе воды щелевыми трубами. Водоснабжение и санитарная техника, 10, 34–37.
5. Clemp, T. (2006). Flow in Perforated Pipes: A Comparison of Models and Experiments. SPE Production & Operations, 21 (02), 302–311. doi: <https://doi.org/10.2118/89036-pa>
6. Murphy, P., Kaye, N. B., Khan, A. A. (2014). Hydraulic Performance of Aggregate Beds with Perforated Pipe Underdrains Flowing Full. Journal of Irrigation

and Drainage Engineering, 140 (8), 04014023. doi: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ir.1943-4774.0000740](https://doi.org/10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000740)

7. Yuan, H., Sarica, C., Miska, S., Brill, J. P. (1997). An Experimental and Analytical Study of Single-Phase Liquid Flow in a Horizontal Well. *Journal of Energy Resources Technology*, 119 (1), 20–25. doi: <https://doi.org/10.1115/1.2794217>

8. Альтшуль, А. Д. (1970). Гидравлические сопротивления. М.: Недра, 216. URL: <https://www.libex.ru/detail/book809719.html>

9. Krogstad, P.-A., Kourakine, A. (1999). The response of a turbulent boundary layer to injection through a porous strip. *Turbulence and Shear Flow. First Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena. California*, 1, 429–434. URL: <http://www.dl.begellhouse.com/references/3ce1b491115b5c16,17cc020a1e8f98da,50d9cfba30f65c40.html>

10. Shima, N., Saito, N., Okamoto, M. (1999). Prediction of Wall-Bounded Turbulent Flows with Blowing and Suction. Testing of a Second-Moment Closure without Wall-Reflection Redistribution Terms. *JSME International Journal Series B*, 42 (4), 626–633. doi: <https://doi.org/10.1299/jsmeb.42.626>

11. Чехунов, В. И., Чехунов, П. В. (1990). Коэффициент расхода отверстия перфорации стенки трубы при притоке воды. Совершенствование методов гидравлических расчетов водопропускных и очистных сооружений. Саратов, 86–90.

12. Na, T. Y. (1972). Analysis of Turbulent Pipe Flow With Mass Transfer. *Journal of Basic Engineering*, 94 (3), 700–703. doi: <https://doi.org/10.1115/1.3425529>

13. Талиев, В. Н. (1979). Аэродинамика вентиляции. М.: Стройиздат, 295. URL: http://books.totalarch.com/aerodynamics_of_ventilation

14. Науменко, І. І., Волощук, В. А. (2001). Математичні моделі для гідравлічних розрахунків трубопроводів з дискретно зростаючими витратами. Вісник Рівненського державного технічного університету, 1 (8), 88–99.

15. Eliahou, S., Tumin, A., Wygnanski, I. (1998). Laminar–turbulent transition in Poiseuille pipe flow subjected to periodic perturbation emanating from the wall. *Journal of Fluid Mechanics*, 361, 333–349. doi: <https://doi.org/10.1017/s002211209800888x>

16. Кравчук, А. М., Кравчук, О. Я. (2018). Приклади гідравлічного розрахунку напірних збірних і розподільчих трубопроводів. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 30, 31–35. URL: <http://wateruse.org.ua/article/view/204850/204766>

17. Claudio, D. (1961–1962). Icondotti emungenti da in serbatoio. Contronto fra risultati teorici sperimentali atti e men. *Accad. patav. scilettere ed arti*, 74 (2), 188–197.

18. Василенко, А. А., Кравчук, А. М. (1991). Гидравлический расчет сборных трубопроводов в сооружениях водоснабжения и водоотведения. Гидравлика и гидротехника, 52, 57–61.