

УДК 532.542

А.М. КРАВЧУК, доктор технічних наук  
Київський національний університет будівництва та архітектури  
О.Я. КРАВЧУК, старший викладач  
Національний транспортний університет

**ДО МЕТОДИКИ ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРАХУНКУ НАПІРНИХ  
ПЕРФОРОВАНИХ РОЗПОДІЛЬЧИХ ТРУБОПРОВІДІВ СИСТЕМ  
ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ**

*Виконано аналіз існуючої методики гідравлічного розрахунку розподільчих напірних перфорованих трубопроводів систем водопостачання та водовідведення, приведено рекомендації для її вдосконалення, розглянуто приклад розрахунку.*

© А.М. Кравчук,  
О.Я. Кравчук, 2015

**Ключові слова:** перфорований трубопровід, втрати напору, змінна витрата, коефіцієнт витрати, гідравлічний коефіцієнт тертя, показник рівномірності збору.

*Выполнен анализ существующей методики гидравлического расчета распределительных напорных трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения, приведены рекомендации для ее усовершенствования, рассмотрен пример расчета.*

**Ключові слова:** перфорированный трубопровод, потери напора, переменный расход, коэффициент расхода, гидравлический коэффициент трения, показатель равномерности сбора.

*The analysis of existent method of hydraulic calculation of pressure perforated distributing pipelines of water supply and water sewerage systems is accomplished, the recommendations for its improvement are adduced, the example of its calculation is reviewed.*

**Keywords:** perforated pipeline, head loss, variable discharge, discharge coefficient, hydraulic coefficient of friction, index of capture uniformity.

Трубопроводи, які працюють зі змінною витратою вздовж шляху, знаходять широке застосування в різних областях техніки. В даній роботі розглядаються труби, що використовуються для розподілу води в спорудах очистки природних і стічних вод.

Приведені нижче методики рекомендуються для застосування при розрахунку напірних трубопроводів, які працюють в усталеному режимі без транзиту, мають незмінний діаметр і постійну інтенсивність перфорації по своїй бічній поверхні.

У відповідності до діючих норм [1], при відомих (прийнятих) конструктивних характеристиках труб, загальні втрати напору визначаються за залежністю

$$h = \zeta \frac{V^2}{2g}, \quad (1)$$

де  $\zeta$  – коефіцієнт опору труби.

Для прямолінійного розподільчого трубопроводу з круглими отворами, який працює повним перерізом, він приймається

$$\zeta = \frac{2,2}{K_n^2} + 1, \quad (2)$$

тут  $K_n = \frac{\sum \omega_o}{\Omega}$  – коефіцієнт перфорації, відношення сумарної площі отворів або щілин до площі поперечного перерізу прямолінійної труби або колектору ( $0,15 \leq K_n \leq 2,0$ ).

Окрім того, в нормах приведені рекомендації по забезпеченню граничних швидкостей в початковому і кінцевому перерізах трубопроводу. Також вказуються мінімально допустимі розміри отворів перфорації.

Розглядувана методика гідравлічного розрахунку, з нашої точки зору є суттєво спрощеною, так як вона недостатньо враховує особливості руху рідини зі змінною витратою вздовж каналу і тому не забезпечує їх раціональне конструювання.

В даній роботі пропонується нова, більш досконала, методика розрахунку даних труб, розроблена на основі, як отриманими авторами даних, так і матеріалів інших авторів.

Як показано в роботі Г.А. Петрова [2], усталений рух рідини в напірному прямолінійному трубопроводі постійного діаметру з рівномірною перфорацією вздовж шляху можна описати диференціальним рівнянням виду

$$\frac{dh}{dx} + \frac{(2-m)\alpha_o}{g\Omega^2} Q \frac{dQ}{dx} + \frac{\lambda_{3M}}{2g\Omega^2 D} Q^2 = 0, \quad (3)$$

де  $h, Q$  – відповідно, змінні за довжиною напір і витрата в розглядуваному перерізі;  $D, \Omega$  – діаметр і площа перерізу труби;  $\lambda_{3M}$  – гідравлічний коефіцієнт тертя у випадку руху рідини зі змінною витратою;  $\alpha_o$  – коефіцієнт кількості руху ( $\alpha_o \approx 1$ );  $m$  – коефіцієнт змінюваної маси (для розподільчих трубопроводів можна приймати  $m = 0,3$ ).

Другим рівнянням для описання характеристик даного потоку може служити рівняння витікання через отвір

$$\frac{dQ}{dx} = \mu \alpha_n \sqrt{2gh}, \quad (4)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт витрати отворів перфорації;  $\alpha_n = \frac{\sum \omega_o}{l}$  – площа отворів на одиницю довжини труби.

Розгляд вихідної математичної моделі для випадку роботи розподільчого трубопроводу (рівняння (3), (4)), здійснено в роботі [3].

У відповідності з останнім, всі розподільники умовно поділяються на відносно короткі і відносно довгі труби. До відносно коротких відносяться труби у яких коефіцієнт опору за довжиною  $\zeta_{l,p} = \lambda_p \frac{l}{D} \leq \frac{1,7}{A_k}$ . Всі інші розподільники будемо відносити до довгих. Тут  $A_k$  – параметр, який приймається за таблицею 1.

Таблиця 1

$\chi_p$	0,99	0,97	0,95	0,93	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70
$A_k$	0,503	0,510	0,518	0,525	0,537	0,558	0,583	0,610	0,641
$C_k$	0,209	0,362	0,468	0,553	0,663	0,816	0,947	1,063	1,169

У відповідності з отриманими розв'язками, витрата в початковому перерізі розподільника буде:

- для відносно коротких труб

$$Q_n = \frac{1}{k} \operatorname{tg}(k\bar{f}) \Omega \sqrt{2gh_n}; \quad (5)$$

- для відносно довгих труб

$$Q_n = \frac{1}{k} \operatorname{th}(k\bar{f}) \Omega \sqrt{2gh_n}, \quad (6)$$

де  $k$  – коефіцієнт, який визначається за графіком на рис.1;  $\bar{f} = \frac{\mu_p \alpha_n l}{\Omega} = \mu_p K_n$  – скважність трубопроводу;  $h_n$  – напір в початковому перерізі;  $\mu_p$  – середній для всього трубопроводу коефіцієнт витрати отворів перфорації, який рекомендується визначати за емпіричною залежністю

$$\mu_p = 0,72 - 0,065K_n. \quad (7)$$

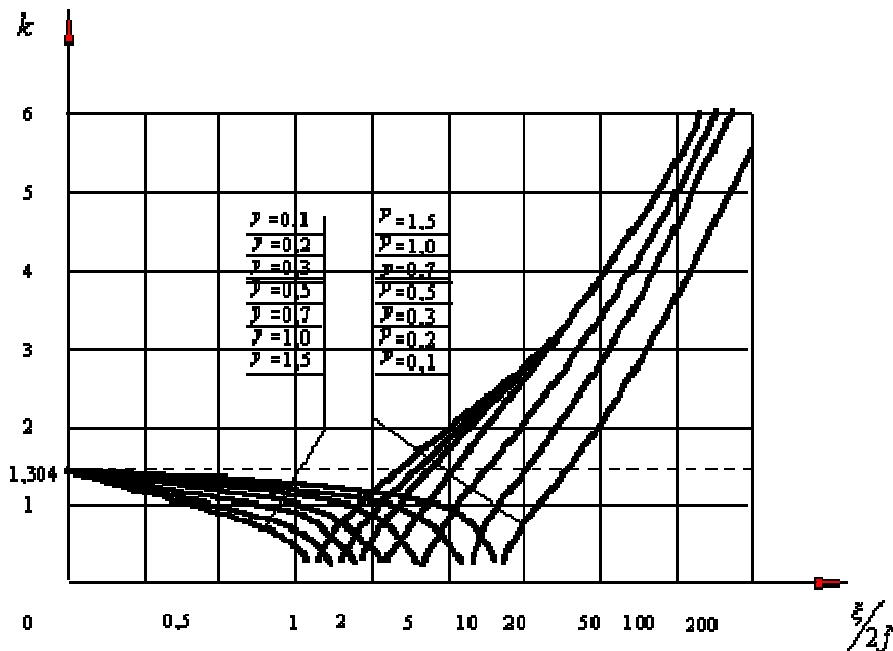


Рис.1. Графік для визначення коефіцієнта  $k$ .

При наявності в трубі транзитної витрати ( $Q_{\text{тр}}$ ) відповідна залежність приймає вигляд

$$\mu_p = 0,72 - 0,1 \frac{Q_{\text{тр}}}{Q_n} - 0,065 \left( 1 + \frac{Q_{\text{тр}}}{Q_n} \right)^{0,9} K_n. \quad (8)$$

Дана формула справедлива в межах  $0,1 \leq K_n \leq 2,2$  і  $\delta_* = \frac{\delta}{d_o} = 0,3 \dots 1,4$ .

Питання про визначення величини коефіцієнта опору і втрат напору в розподільчому трубопроводі має певні особливості. Відомо, що при відносно невеликих довжинах розподільників, п'єзометрична лінія за їх довжиною зростає. За нашими даними напір в кінцевому перерізі буде дорівнювати

напору в початковому в середньому при  $\zeta_{I_p} \approx 5,2$ . Тобто, при коефіцієнті опору розподільника  $\zeta_{I_p} \leq 5,2$  втрати напору в ньому можна не враховувати.

При більших значеннях  $\zeta_{I_p}$ , тобто, при збільшенні довжини труби, коефіцієнт опору визначається за залежністю

$$\zeta_{p,d} = \frac{k^2}{th^2(k\mu_p K_n)}. \quad (9)$$

Загальні втрати напору вздовж труби, з певним запасом, складуть

$$h = \frac{k^2}{th^2(k\mu_p K_n)} \frac{V_n^2}{2g}. \quad (10)$$

Показник рівномірності роздачі рідини  $\chi$ , який дорівнює відношенню мінімальної від'єднуваної витрати на ділянці труби до максимальної від'єднуваної витрати на ділянці такої ж довжини в другій частині труби, в залежності від параметра  $\zeta_{I_p}$ , буде визначатися так:

$$\text{– при } \zeta_{I_p} < \frac{1,5}{A_k} \quad \chi_{p,k} = \cos(k\mu_p K_n); \quad (11)$$

$$\text{– при } \frac{1,5}{A_k} \leq \zeta_{I_p} \leq \frac{1,5}{A_d} \quad \text{– в трубопроводі при рівномірній}$$

перфорацииможлива рівномірна роздача рідини у випадку, коли виконується співвідношення

$$\mu_p K_n \approx \frac{Q_n}{\Omega \sqrt{2gh_n}}; \quad (12)$$

$$\text{– при } \frac{1,5}{A_d} < \zeta_{I_p} \leq 5,2 \quad \chi_{p,k} = \cos\left(k\mu_p K_n \frac{3,4}{\zeta_{I_p}}\right); \quad (13)$$

$$\text{– при } \zeta_{I_p} > 5,2 \quad \chi_{p,k} = \frac{ch\left(k\mu_p K_n \frac{3,4}{\zeta_{I_p}}\right)}{ch(k\mu_p K_n)}. \quad (14)$$

Гідравлічний коефіцієнт тертя розподільного трубопроводу слід знаходити з виразу

$$\lambda_p = \beta \lambda_o, \quad (15)$$

де  $\lambda_o$  – гідравлічний коефіцієнт тертя трубопроводу при постійній витраті, рівній витраті на початку розподільника, визначається за відомими залежностями, наприклад [4]

$$\lambda_o = 0,11 \left( \frac{\Delta_{ек}}{D} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (16)$$

де  $\Delta_{ек}$  – еквівалентна шорсткість матеріалу стінок труби;  $Re = \frac{V_n D}{\nu}$  – число Рейнольдса в початковому перерізі;  $\beta$  – поправочний коефіцієнт, який при відсутності транзитної витрати, розраховується за залежністю

$$\beta = 1,14K_n^{-0,32}. \quad (17)$$

При наявності транзиту відповідна залежність приймає вигляд

$$\beta = \left( 1,14 - 0,48 \frac{Q_{\text{тр}}}{Q_n} \right) K_n^{-0,32}. \quad (18)$$

Залежності (17, 18) можна використовувати при  $0,1 < K_n < 1,5$ .

Таким чином, можна стверджувати, що за запропонованою методикою, знаючи характеристики трубопроводу і потоку в ньому, показник рівномірності розподілу і початкову витрату води, за формулою (8) можна зразу визначити коефіцієнт опору розподільника, а за (9) втрати напору в ньому. При цьому порядок розрахунку буде наступним:

– по заданій допустимій швидкості руху в початковому перерізі знаходимо стандартний діаметр трубопроводу

$$D = 1,13 \sqrt{\frac{Q_n}{V_d}}; \quad (19)$$

– визначаємо коефіцієнт перфорації:

$$\text{а) при } \zeta_{l,p} < \frac{1,5}{A_k} \quad K_n = \frac{C_k}{\sqrt{1,7 - \zeta_{l,p} A_k}}; \quad (20)$$

$$\text{б) при } \zeta_{l,p} > \frac{1,5}{A_d} \quad K_n = \frac{C_d}{\sqrt{\zeta_{l,p} A_d - 1,7}}, \quad (22)$$

$$\text{де } \zeta_{l,p} = \lambda_p \frac{l}{D};$$

– знаючи величину коефіцієнта перфорації  $K_n$  і площу поперечного перерізу труби  $\Omega = \frac{\pi D^2}{4}$ , а також прийняв діаметр отворів перфорації  $d_o$ , визначаємо загальну кількість отворів у трубопроводі

$$n = \frac{K_n \Omega}{\omega_o}, \quad (23)$$

де  $\omega_o = \frac{\pi d_o^2}{4}$  – площа перерізу одного отвору.

Розділив  $n$  на довжину  $l$ , отримаємо кількість отворів на одному погонному метрі довжини труби;

– знаходимо коефіцієнт опору розподільника

$$\zeta_p = \frac{B_d}{K_n^2}; \quad (20)$$

– втрати напору розраховуємо за залежністю (1) прийняв  $V = V_n$ .

– значення коефіцієнтів  $A_k, C_k$  і  $A_d, B_d, C_d$ , які входять в розрахункові формули, в залежності від величини показника рівномірності роздачі для відносно коротких труб приведені в табл. 1, для відносно довгих – в табл. 2

Таблиця 2

$\zeta_{/p}$	$\chi_p = 0,99$			$\chi_p = 0,95$			$\chi_p = 0,90$		
	$A_d$	$B_d$	$C_d$	$A_d$	$B_d$	$C_d$	$A_d$	$B_d$	$C_d$
5,2	0,494	2,206	0,276	0,471	2,434	0,635	0,442	2,767	0,934
5,5	0,495	2,214	0,265	0,473	2,413	0,610	0,446	2,713	0,894
6,0	0,495	2,199	0,254	0,475	2,392	0,581	0,451	2,654	0,848
8,0	0,496	2,196	0,231	0,480	2,345	0,526	0,459	2,558	0,764
10,0	0,496	2,194	0,222	0,481	2,336	0,506	0,462	2,531	0,734
15,0	0,496	2,192	0,216	0,482	2,321	0,488	0,465	2,503	0,706
20,0	0,497	2,190	0,212	0,483	2,316	0,482	0,466	2,493	0,697
25,0	0,497	2,188	0,210	0,483	2,314	0,479	0,466	2,490	0,694
30,0	0,497	2,186	0,210	0,483	2,312	0,478	0,466	2,487	0,691
40,0	0,497	2,185	0,209	0,483	2,311	0,476	0,466	2,486	0,690

Продовження таблиці 2

$\zeta_{/p}$	$\chi_p = 0,8$			$\chi_p = 0,7$		
	$A_d$	$B_d$	$C_d$	$A_d$	$B_d$	$C_d$
5,2	0,386	3,634	1,429	0,330	4,964	1,925
5,5	0,393	3,494	1,363	0,342	4,629	1,816
6,0	0,402	3,337	1,284	0,354	4,301	1,700
8,0	0,418	3,088	1,146	0,378	3,789	1,497
10,0	0,424	3,006	1,096	0,386	3,626	1,424
15,0	0,429	2,932	1,051	0,394	3,493	1,362
20,0	0,431	2,914	1,037	0,396	3,449	1,341
30,0	0,432	2,904	1,031	0,397	3,430	1,332
35,0	0,432	2,983	1,024	0,397	3,423	1,328
40,0	0,432	2,881	1,024	0,398	3,416	1,324

### Приклад розрахунку

Визначити витрату, яку можна розподілити через перфорований трубопровід (витрату в початковому перерізі  $Q_n$ ) з характеристиками:  $K_n = 1,2$ ;  $l = 5,0\text{м}$ ;  $D = 0,1\text{м}$ ;  $\lambda_o = 0,022$ ;  $h_n = 1,0\text{м}$ . Також знайти показник рівномірності розподілу води  $\chi$  в розглядуваному випадку.

### Розв'язок

1. За залежністю (7) розраховуємо середній для всього трубопроводу коефіцієнт витрати

$$\mu_p = 0,72 - 0,065K_n = 0,72 - 0,065 \cdot 1,2 = 0,64.$$

2. За формулою (17) знаходимо значення поправочного коефіцієнту

$$\beta_p = 1,14K_n^{-0,32} = 1,14 \cdot 1,2^{-0,32} = 1,08$$

3. За формулою (15) визначаємо гідравлічний коефіцієнт тертя

$$\lambda_p = 1,08\lambda_o = 1,08 \cdot 0,022 = 0,024.$$

Розраховуємо коефіцієнт опору за довжиною

$$\zeta_{I_p} = \lambda_p \frac{l}{D} = 0,024 \frac{5}{0,1} = 1,2$$

і параметр

$$\frac{\zeta_{I_p}}{2f} = \frac{\zeta_{I_p}}{2\mu_p K_n} = \frac{1,2}{2 \cdot 0,64 \cdot 1,2} = 0,78 .$$

4. За графіком на рис.1 знаходимо значення коефіцієнта  $k = 1,0$ .

5. Витрату в початковому перерізі розподільника визначаємо за залежністю (5)

$$Q_n = \frac{1}{K} \operatorname{tg}(k\mu_p K_n) \Omega \sqrt{2gh_p} = \frac{1}{0,9} \operatorname{tg}(0,9 \cdot 0,64 \cdot 1,2) 0,00785 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1} = 0,032 \text{ м}^3/\text{с}.$$

6. Показник рівномірності розподілу підраховуємо за формулою (11)

$$\chi = \cos(k\mu_p K_n) = \cos(0,9 \cdot 0,64 \cdot 1,2) = 0,77.$$

### Список літератури

1. *Пособие по проектированию сооружений для очистки и подготовки воды (к СНиП 2.04.02–84 "Водоснабжение. Наружные сети и сооружения")* // НИИ КВОВ АКХ им. К.Д. Памфилова. – Москва, 1988. – 128 с.
2. *Петров Г.А. Гидравлика переменной массы.* / Изд.–во Харьковского университета. – Х.: 1964. – 224 с.
3. *Кравчук А.М. Расчет перфорированных распределительных трубопроводов произвольной длины* // Науковий вісник будівництва. – Харків, – 2002.– №20. –С. 72–78.
4. *Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления.* – М.: Недра, 1970. – 216 с.

*Надійшло до редакції 12.11.2015*