

Я.А. ТУГАЙ, кандидат технічних наук

Ю.М. ПІКУЛЬ, кандидат технічних наук

Г.В. МАЙСТРЕНКО, аспірант

Київський національний університет будівництва і архітектури

## ГІДРАВЛІЧНИЙ ОПІР ВНУТРІШНІХ ПОТОКІВ ДРЕН-ПРОМЕНІВ

*Надається аналіз застосування коефіцієнтів гідравлічного опору при розрахунках течій в трубах-променях водозаборів та дренажів.*

**Ключові слова:** гідравлічні опори; дренаж; променевий водозабір.

*Предоставляется анализ применения коэффициентов гидравлического сопротивления при расчетах течений в трубах-лучах водозаборов и дренажей.*

**Ключевые слова:** гидравлические сопротивления; дренаж; лучевой водозабор.

*The articles gives the analysis of application of the hydraulic resistance coefficients for calculating of groundwater flow in the pipes of radial intakes and drainages.*

**Keywords:** hydraulic resistances; drainage; radial groundwater intake.

Важливим параметром при врахуванні течії потоку всередині дрени-променя практично в усіх залежностях являються коефіцієнти гідравлічних опорів  $\lambda$  і  $C$ . Відомо, що зв'язок між цими коефіцієнтами визначається залежністю

$$C = \sqrt{8g/\lambda} \quad (1)$$

і, в цілому, залежить від режиму течії рідини в трубах, який визначається значеннями числа Рейнольдса та еквівалентною шорсткістю,  $\lambda = f(\text{Re}, \Delta_{\text{екв}}/d)$ .

Як показали проведені дослідження, коефіцієнт  $\lambda$  в трубах, з приєднанням витрати буде більшим ніж при звичайному рівномірному русі рідини, і тому в загальному випадку може бути визначеним за формулою:

$$\lambda_0 = \alpha\lambda, \quad (2)$$

де  $\alpha > 1$  і залежить від інтенсивності протікання рідини по довжині дрени-променя;  $\lambda$  – коефіцієнт опору (тертя) в умовах рівномірного руху води при однакових значення числа  $\text{Re}$  в кінці труби.

Зокрема, за даними О.О. Василенка [1], для визначення коефіцієнта  $\alpha$

пропонується така наближена залежність:

$$\alpha = 4,6 - 0,7 \lg n \operatorname{Re}, \quad (3)$$

де  $n = f \left( \frac{\sum \omega_n}{\omega} \right)$  і наводиться в [1];  $\sum \omega_n$  – площа перфорація дренажної труби.

Формула (3) може бути використана при  $\lg n \operatorname{Re} = 1,6 \dots 5,2$ . В літературі наведені і інші залежності для визначення параметра  $\alpha$ .

Так в роботі [2] значення коефіцієнта  $\alpha$  на підставі проведених дослідів рекомендується приймати в залежності від шпаруватості  $f = \frac{\sum \omega_n}{\omega}$ , а саме:  $\alpha = 1,5$  при  $f = 0,5$ ;  $\alpha = 1,3$  при  $f = 1,0$ ;  $\alpha = 1,1$  при  $f = 1,5$ ;  $\alpha = 1$  при  $f = 2$ .

В спеціальній літературі [3-7] для визначення коефіцієнтів  $\lambda$  і  $C$  наводиться низка залежностей, які враховують матеріал дренажних труб, їх шорсткість, наявність перфорації та інших отворів для пропуску фільтраційних вод.

Відомо, що для гладких круглих труб при ламінарному режимі, теоретичним шляхом отримано:

$$\lambda = 64 / \operatorname{Re}. \quad (4)$$

Визначальний вплив на режим течії в трубі має наявність шорсткості. Для гідравлічних гладких труб, коли шорсткість не впливає на характеристики потоку ( $\operatorname{Re} \leq 10 d / \Delta_{\text{екв}}$ ), для визначення коефіцієнту  $\lambda$  пропонується відома формула Блазіуса:

$$\lambda = 0,3164 \operatorname{Re}^{0,25}. \quad (5)$$

Коли ж шорсткість впливає на течію води в трубах ( $\operatorname{Re} > 500 d / \Delta_{\text{екв}}$ ), для визначення коефіцієнту  $\lambda$  пропонується формула Б.Л. Шифрінсона:

$$\lambda = 0,1 (\Delta_{\text{екв}} / d)^{0,25}. \quad (6)$$

В межах  $500 d / \Delta_{\text{екв}} > \operatorname{Re} > 10 d / \Delta_{\text{екв}}$  для розрахунків пропонується формула А.Д. Альтшуля, котра має вигляд:

$$\lambda = 0,1 (\Delta_{\text{екв}} / d + 64 / \operatorname{Re})^{0,25}. \quad (7)$$

Більш загальна формула для визначення коефіцієнту  $\lambda$  в цьому випадку має вигляд:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = C \lg \frac{ad}{\Delta_{\text{екв}}} = C \lg \frac{d}{\Delta_{\text{екв}}} + b, \quad (8)$$

де по Прандлю-Ніколадзе  $a = 3,1$ ;  $b = 1,4$ ;  $C = 2,0$ ; по А.Д. Альтштулю  $a = 10$ ;  $b = 1,8$ ;  $C = 1,8$ ; по А.В. Теплому  $a = 8,24$ ;  $b = 1,65$ ;  $C = 1,8$ ; по І.Ф. Федорову  $a = 3,42$ ;  $b = 1,07$ ;  $C = 2,0$ .

Числові значення еквівалентної шорсткості  $\Delta_{\text{екв}}$  для різних труб і каналів та графіки для визначення  $\lambda$  наведені в довіднику [6].

Враховуючи матеріал труб, можна навести наступні відомі з літератури формули для визначення коефіцієнту  $\lambda$ .

Для керамічних труб:

$$\lambda = \text{Re}^{0,48} / 7250; \quad (9)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left( \frac{\Delta_{\text{екс}}}{3,7d} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right). \quad (10)$$

Для пластмасових труб:

$$\lambda = 0,288 / \text{Re}^{0,226} = 0,01344 / (d \cdot V)^{0,22}; \quad (11)$$

поліетиленових

$$\lambda = \frac{0,318}{d^{0,09} \text{Re}^{0,25}}; \quad (12)$$

полівінілхлоридних

$$\lambda = (0,386 - 0,0028d)(d/Q)^{0,22}, \quad (13)$$

де  $Q$  – витрата, л/с;  $d$  – внутрішній діаметр труб, мм.

Для труб з інших матеріалів використовується формула Шевелева Ф.А. [6]:

$$\lambda = b(1 - a/V)^n d^{-m}, \quad (14)$$

де значення  $a$ ,  $b$ ,  $n$  і  $m$  у залежності від матеріалу труб приймається за табл.1.

Таблиця 1

**Значення параметрів для формули Шевелева**

Матеріал труб	$a$	$b$	$n$	$m$
Нові сталеві	0,684	0,0159	0,226	0,226
Нові чавунні	2,36	0,0144	0,284	0,284
Не нові чавунні та сталеві				
при $V > 1,2$ м/с	0	0,021	0,3	0,3
при $V < 1,2$ м/с	0,876	0,0179	0,3	0,3
Азбестоцементні	3,51	0,011	0,19	0,19

Для залізобетонних напірних труб значення  $a$ ,  $b$ ,  $n$  і  $m$  такі, як для азбестоцементних, а значення параметру  $b$  збільшується приблизно в 1,45 рази [6].

В інженерних розрахунках гідравлічних опорів використовують такий показник, як модуль питомого опору  $A$ , який зв'язаний з коефіцієнтом тертя  $\lambda$  та модулем витрати  $K$  залежністю:

$$A = \frac{8\lambda}{g\pi^2 d^5} = \frac{1}{K^2}. \quad (15)$$

Значення  $\lambda$ ,  $A$  і  $K$  для ненових сталевих та чавунних труб вираховуються за формулами:

$$\lambda = K\lambda_*, \quad A = KA_*, \quad K = nK_*, \quad (16)$$

де значення  $\lambda_*$ ,  $A_*$  і  $K_*$ ,  $n$  приймають за таблицями 3,4 та 3,5 довідника [6].

Значення  $\lambda$ ,  $A$  і  $K$  для нових сталевих і чавунних труб, а також азбестоцементних, пластмасових, керамічних, скляних та залізобетонних визначаються за формулами:

$$\lambda = K_1 \lambda_1, \quad A = K_1 A_1, \quad K = n_1 K_1, \quad (17)$$

де значення  $K_1$ ,  $n_1$  і  $\lambda_1$ ,  $A_1$  приймають за таблицями 3,6 та 3,7 [6].

Зазначимо, що для нових сталевих і чавунних труб параметри  $A_1$  відповідно приймають:

$$A_{1c} = 0,851d^{0,074} A_{*c}; \quad (18)$$

$$A_{1ч} = 0,97d^{0,016} A_{*ч}. \quad (19)$$

Опір промислових труб із різних матеріалів і в різних умовах експлуатації при практичних розрахунках пропонується вираховувати за формулою Л.Тапакса з двома параметрами шорсткості [6].

В роботі [5] наведені результати досліджень та рекомендації для визначення гідравлічних параметрів у так званих гофрованих дренажних трубах, різні конструкції яких широко використовуються в меліоративній практиці, в тому числі і гідравлічних опорів, з врахуванням конструктивних особливостей цих труб і умов втікання в них фільтраційних вод.

В окремих випадках для визначення гідравлічного опору використовують коефіцієнт Шезі  $C$ , котрий зв'язаний з коефіцієнтом  $\lambda$  залежністю (1). Для визначення коефіцієнту  $C$  в квадратичній області опору ( $h \approx V^2$ ) пропонується формула М.М. Павловського:

$$C \approx R^y / n, \quad (20)$$

де  $R$  – гідравлічний радіус, м;  $n$  – коефіцієнт шорсткості.

На практиці використовують один із спрощених варіантів формули (20), а саме:

$$y = 1,5\sqrt{n}, \quad \text{при } R < 1 \text{ м}; \quad (21)$$

$$y = 1,3\sqrt{n}, \quad \text{при } R > 1 \text{ м}. \quad (22)$$

При  $y = 1/6$  одержимо відому формулу Манінга, а при  $y = 1/5$  – формулу Форхгеймера.

Для визначення  $C$  в умовах турбулентної течії пропонується формула А.Д. Альтшуля та Й.І. Агроккіна [6]:

$$C = 25 \left[ \frac{R}{(80n)^6 + \frac{0,025}{\sqrt{R}}} \right], \quad (23)$$

$$C = \frac{1}{n} + 17,72 \lg R. \quad (24)$$

Відома також формула Базена:

$$C = \frac{87}{1 + \gamma/\sqrt{R}} = \frac{87}{1 + 2\gamma/\sqrt{d}}, \quad (25)$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт шорсткості ( $\gamma \approx 0,27$ ).

В умовах безнапірної течії в трубах і перехідної області опору М.М. Федоровим запропоновано формулу:

$$W = C\sqrt{R} = -4 \lg \left( \frac{\Delta_{екв}}{13,68R} + \frac{a_2}{Re} \right) \sqrt{2gR}, \quad (26)$$

де еквівалентна шорсткість  $\Delta_{екв}$  і коефіцієнт визначається з табл.2.

Зазначимо, що методика визначення гідравлічного радіуса  $R$  для безнапірних труб наведена в підручниках, зокрема [6, 8].

Таблиця 2

**Значення  $\Delta_{екв}$  і коефіцієнта  $a_2$  для формули Федорова**

Матеріал труб	$\Delta_{екв}$ , мм	$a_2$
Азбестоцементні	0,6	73
Керамічні	1,35	90
Бетонні та залізобетонні	2	100

Зауважимо, що формули для визначення коефіцієнта Шезі  $C$ , за винятком формули для квадратичної області опору, як показали численні експериментальні дослідження, не завжди дають позитивні результати.

В трубах горизонтального дренажу досить часто квадратичний закон опору не виконується. В цьому випадку, за думкою М.М. Павловського, при розрахунках гідравлічного опору потрібно враховувати число  $Re$ .

Як зазначалося вище, в деякій мірі за рахунок поправкового коефіцієнта  $\alpha$  можна визначити  $\lambda$ , враховуючи змінний характер приєднаної до дрени витрати, за рахунок змінної інтенсивності протікання рідини по довжині труби через різні отвори.

Проте, в зв'язку з відсутністю більш надійних рекомендацій по визначенню коефіцієнта  $\alpha$  при виконанні практичних розрахунків вплив низки факторів, пов'язаних із зміною структури потоку в придренній зоні, порушення лінійного закону фільтрації і т.п., враховується додатковим опором за характером розкриття пласта  $\Phi_x$ , котрий додається до основного опору на недосконалість дрени  $\Phi$ . В цьому випадку при визначенні гідравлічних втрат напору всередині дрени достатньо приймати коефіцієнт тертя  $\lambda$  без поправкового коефіцієнта  $\alpha$ .

Зокрема, в роботі [8] стосовно дослідження промислових труб-фільтрів у випадку пластмасових перфорованих труб з волокнистим фільтром, отримані залежності для визначення розміру шпарин, доцільних параметрів перфорації і додаткового опору  $\Phi_x$ , який в більшості досліджених випадках складає

5...10% від загального. За результатами проведених дослідів наводяться рекомендації щодо обґрунтування конструкції променевих дренажів для промислового впровадження.

Моделювання гідравліки напірних трубопроводів зі змінною масою і розробка методів розрахунку таких трубопроводів розглянуто в докторській дисертації А.М. Кравчука [9]. На базі проведених досліджень, зокрема, для визначення втрат напору в перфорованих трубах, рекомендована формула:

$$\Delta h = \xi_p \frac{V^2}{2g}. \quad (27)$$

Для визначення коефіцієнту  $\xi_p$  в роботах [2, 9, 10] запропоновано низку залежностей. В цьому випадку також можна скористатись наближеною рекомендацією БНіП 2.04.02-84:

$$\xi_p = \frac{2 \cdot 2}{f^2} + 1, \quad f = \frac{\sum \omega_A}{\omega}. \quad (28)$$

Важливим питанням при формуванні потоку ґрунтових вод і витрати променів-дрен є розрахунки водоприймальної здатності дренажних труб, фільтру та фільтруючого обсіпання.

В роботах [3, 7, 11-13] наведені розрахунки різних отворів залежно від матеріалу труб, дотримання вимог щодо розміщення їх на поверхні труб та гідравлічних умов їх роботи. Проводяться також рекомендації по добору складу фільтру, котрий влаштовується з різних сипких матеріалів. Останнім часом в якості матеріалу фільтра пропонується використовувати штучні матеріали у вигляді поєстї та полотна з базальтових, полімерних і інших волокон самостійно або разом з піщано-гравійним обсіпанням [7, 12, 13].

Для визначення витрати, розподілу середньої швидкості і напору по довжині дрени-променя в роботі [14] запропоновані наступні рівняння:

$$q = \frac{k(H_k - H_\delta^0(y))}{\bar{\Phi}_\delta}; \quad (29)$$

$$\bar{V}_{r_\delta} = A \left\{ \left[ \exp(a+b) \frac{y}{2} \right] - \exp \left[ (b-a) \frac{y}{2} \right] \right\}; \quad (30)$$

$$H_\delta^0(y) = H_k - \left( \bar{\Phi}_\delta \frac{\omega A}{2k} \right) \left\{ (a+b) \exp \left[ (a+b) \frac{y}{2} \right] + (a-b) \exp \left[ (b-a) \frac{y}{2} \right] \right\}, \quad (31)$$

де

$$A = \frac{2k(H_k - H_\delta^0)}{\bar{\Phi}_\delta \omega \left\{ (a+b) \exp \left[ (a+b) \frac{l}{2} \right] + (a-b) \exp \left[ (b-a) \frac{l}{2} \right] \right\}};$$

$$b = \frac{\bar{V}_{r_\delta}}{\bar{\Phi}_\delta \omega}, \quad \xi = \frac{\lambda}{2r_\delta}, \quad a = \sqrt{b^2 + \xi b}.$$

Розглянемо приклад розрахунку, за методикою представленою формулами (29-31), при наступних вихідних даних:  $l = 100$  м,  $r_g = 0,1$  м,  $k = 0,75$  м/добу,  $\Phi_g = 5$  м,  $\lambda = 0,03$ ,  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>.

Спочатку визначаємо параметри  $\xi = 0,15^{-1}$ ,  $V = 0,092$  м/с,  $b = 6,94 \cdot 10^{-6}$  м<sup>-1</sup>,  $a = 1,02 \cdot 10^{-3}$  м<sup>-1</sup>,  $A = 1,793$  м/с,  $\omega = 0,0314$  м<sup>2</sup>. Тоді для визначення швидкості  $V$  та напору  $H_g$  маємо наступні рівняння:  $V = 0,00187x$ ,  $H_g = 5,289 \cdot 10^{-3} x$ .

Проведені розрахунки за формулами для визначення витрати та напору по довжині дрени дозволили зробити наступні висновки. Падіння напору по довжині дрени за рахунок тертя складає незначну величину (при витраті на кінці дрени  $Q = 300$  м<sup>3</sup>/добу, падіння напору  $\Delta h$  складає приблизно 0,004 м) і ним можна знехтувати. Основний приплив формується в першій половині дрени від 0 до 0,5/ і складає 225 м<sup>3</sup>/добу від всієї витрати дрени.

### Список літератури

1. *Василенко А.А., Кравчук А.М.* Гидравлический расчет перфорированных сборных трубопроводов произвольной длины // Гидравлика и гидротехника. НТС. – К.: Стройиздат, 1986. – Вип.43. – С. 70-73.
2. *Чернишев Д.О.* Гідравлічний розрахунок перфорованих розподільчих трубопроводів довільної довжини // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки – Вип. 4, 2005. – С. 157-161.
3. *Духовный В.А., Баклушин Н.Б., Томин Е.П., Серебрянников Ф.В.* Горизонтальный дренаж орошаемых земель. – М.: Колос, 1979. – 225 с.
4. *Мурашко А.И., Сапожников Е.Г.* Защита дренажа от заиления. – Минск: Урожай, 1978. – 165 с.
5. *Мурашко А.И.* Сельскохозяйственный дренаж в гумидной зоне. – М.: Колос, 1982. – 272 с.
6. *Курганов А.М., Федоров Н.Ф.* Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения: справочник. – Л.: Стройиздат, 1986. – 440 с.
7. *Пивовар Н.Г., Бугай Н.Г.* Дренаж с волокнистыми фильтрами для защиты территорий от подтопления. – К.: Институт гидромеханики НАНУ, 2000. – 332 с.
8. *Олійник А.Я., Поляков В.Л.* Дренах переувлажненных земель. – К.: Наукова думка, 1987. – 280 с.
9. *Кравчук А.М.* Гідраліка змінної маси напірних трубопроводів технічних систем // Автореф. дис. докт. техн. наук. – К.: 2004. – 37 с.
10. *Кравчук А.М., Чернишов Д.О.* Гідравлічний розрахунок

перфорованих розподільчих трубопроводів споруд систем водопостачання та водовідведення // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – К.: КНУБА, 2006. – Вип.6 – С. 134-140.

11. *Методические* рекомендації по расчетам защиты территорий от подтопления / Под ред. А.Я. Олейника. – К.: Мин. вод. хоз. УССР, 1980. – 192 с.

12. *Рекомендации* по проектированию и расчетам защитных сооружений и устройств подтопления промышленных площадок грунтовыми водами. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, ПНИИПС, 1979. – 320 с.

13. *Кривоног А.П.* Порова структура волокнисто-пористых полиэтиленовых фильтров // Мелиорация и водное хозяйство. – 1989. – Вып.71. – С.91-93.

14. *Насберг М.В.* Исследование фильтрации в лучевой водозабор с учетом неравномерной интенсивности притока воды по длине лучей и их взаимовлияния. – Авт. канд. дис. НИИ ЭРС, Тбилиси, 1983. – 28 с.

Надійшло до редакції 19.03.2014