

2. За умови забезпечення надійного анкерування ширина розкриття нормальних тріщин залежить як від відсотка армування зовнішньою композитною арматурою, так і від ширини стрічки підсилення. Момент тріщиноутворення підсилених експериментальних зразків збільшився на 14...72 %.

3. Запропоновані розрахункові залежності для визначення моменту тріщиноутворення задовільно узгоджуються з експериментальними даними як автора, так і інших науковців.

1. Кваша В. Застосування композитів CFRP для підсилення залізобетонних мостів в Україні / В. Кваша, І. Мельник, Ю. Собко, А. Мурин, Р. Добрянський // 9th International Scientific Conference: Current issues of civil and environmental engineering. Rzeszow, 3–4 September, 2004. – С. 221–227. 2. Rybak M. Wzmacnianie mostów betonowych za pomocą przyklejanego zbrojenia zewnętrznego / M. Rybak, M. Łagoda // XVIII Konferencja Naukowo-Techniczna: Awarie Budowlane. Szczecin-Międzyzdroje. – 1997. – P.41–50. 3. Meier U. Strengthening of Structures with CFRP Laminates / U. Meier, K. Kaiser // Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures : Proceedings of the Specialty Conference (ASCE). Las Vegas, Nevada. – 1991. – P. 224–232. 4. Kaminska M. Badania zelbetowych belek z tasmami CFRP przyklejnymi na ich powierzchniach / M. Kaminska, R. Kotynia // XVI konferencja naukowo-techniczna: Beton i prefabrykacja. – Т. 2. – Jadwisin. 1998. – S. 479–484. 5. СНУП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с. 6. Мурин А. Я. Міцність нормальних перерізів залізобетонних балок, підсилених зовнішньою композитною арматурою / А.Я. Мурин // Вісник національного університету "Львівська політехніка" "Теорія і практика будівництва". – 2008. – № 627. – С. 155–158. 7. Głodkowska W. Zarysowanie belek zelbetowych wzmocnionych tasmami z włókien węglowych / W. Głodkowska, M. Staszewski // "Problemy naukowo-badawcze budownictwa". – Tom VI: Badawczo-projektowe zagadnienia w budownictwie. – Białystok: Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, 2008. – S. 171–178.

УДК 532.522.2:532.542.4:532.556.2

В.І. Орел

Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра гідравліки та сантехніки

КОЕФІЦІЄНТ ЗМІНИ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ ЗА РАПТОВОГО РОЗШИРЕННЯ ТРУБ

© Орел В.І., 2011

Показано, що ступінчастий перехід в трубопроводі з раптовим розширенням потоку порівняно з різким зменшує гідравлічний опір. Одержано залежність коефіцієнта β у формулі (2) як функцію відносної довжини ділянки між двома раптовими розширеннями потоку.

Ключові слова: раптове розширенням потоку, ступінчастий перехід.

It is shown that a step transition in a pipeline with sudden expansion of flow, comparatively with abrupt, diminishes hydraulic resistance. The dependence of coefficient (β) in the formula (2) as function of length of area between two sudden expansions of a flow, which are one from another approximately on limits of length of an initial area of a jet is offered.

Key words: sudden expansion of a flow, step transition.

Вступ. У гідравлічній мережі відстані між окремими фасонними частинами, перешкодами, запірними або регулювальними пристроями тощо часто бувають малими (а інколи і зовсім відсутні), і наявні прямолінійні ділянки є недостатніми для стабілізації потоку. У цих випадках спостерігається взаємний вплив місцевих гідравлічних опорів.

Так, перехід від труби з діаметром d до труби з діаметром D можна здійснити одразу чи ступінчасто за допомогою проміжного патрубку (рис. 1). Внаслідок цього змінюється ступінь деформації потоку у другому і подальших елементах. Відповідно змінюються і втрати енергії на ділянці взаємного впливу місцевих гідравлічних опорів порівняно з окремими елементами.

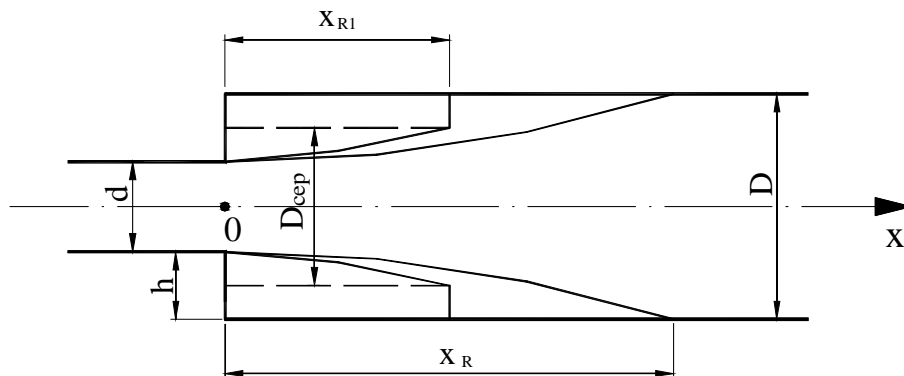


Рис. 1. Заміна раптового розширення труби двома ступінчастими розширеннями

Мета роботи – визначити втрати енергії на ділянці взаємного впливу місцевих гідравлічних опорів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Є кілька методик розрахунку втрат енергії на ділянці взаємного впливу місцевих гідравлічних опорів. Одна з них пропонує використання формули Скобельцина і Хомутова [1; 2, с. 38]:

$$\zeta_{1-2} = k_1 \cdot (\zeta_1 + \zeta_2), \quad (1)$$

де k_1 – коефіцієнт взаємовпливу опорів, який залежить від довжини ділянки між двома місцевими гідравлічними опорами.

Інша методика, на думку автора [3], є обґрунтованішою, ніж зменшення обох коефіцієнтів місцевих гідравлічних опорів ζ_1 та ζ_2 однаковою мірою, є зменшення першого з них:

$$\zeta_{1-2} = \beta \cdot \zeta_1 + \zeta_2, \quad (2)$$

де β – коефіцієнт зміни коефіцієнта опору ζ_1 .

У [1] виділено чотири підзони нерозвиненої течії за місцевим гідравлічним опором. Перша з них – підзона циркуляційної течії та стабілізації профілю тиску. Її довжину можна оцінити за розмірами циркуляційної течії [1]. Хоча для відношення діаметрів $D/d = 1,33 \dots 2,50$ та критерію Рейнольдса $Re_d \approx 10^5$ стабілізації профілю тиску настає пізніше, ніж відбувається повторне приєднання потоку в трубі діаметром D [4, с. 158].

У [5] дифузор замінювався циліндричною трубою, еквівалентною трубі змінного перерізу з однаковими поверхнею та довжиною дифузорної частини. При цьому діаметр еквівалентної циліндричної труби

$$D_o = d + 2a = D - 2a, \quad (3)$$

де a – амплітуда, та вихідний ступінь розширення потоку;

$$n = \frac{\left(1 + \frac{2a}{D_o}\right)^2}{\left(1 - \frac{2a}{D_o}\right)^2}. \quad (4)$$

Для схеми на рис. 1, в [6] діаметр проміжного патрубку брався як середній арифметичний між діаметрами d та D [7], тобто

$$D_{\text{сер}} = \frac{1}{2} \cdot (d + D), \quad (5)$$

що можна переписати як

$$D_{\text{сер}} = d + h = D - h, \quad (6)$$

де h – висота уступу (рис. 1),

$$h = \frac{1}{2} \cdot (D - d). \quad (7)$$

У [6] показано, що $x_{R1} = \frac{1}{2} \cdot x_R$ (рис. 1). Приймаючи відносну довжину ділянки між двома раптовими розширеннями потоку, такою, що дорівнює довжині ділянки повторного приєднання потоку після першого раптового розширення (рис. 1), маємо [6]:

$$x_{R1}/D_{cep} = 4,25 \cdot \left(1 - 1/\sqrt{n_1}\right), \quad (8)$$

де n_1 – ступінь розширення потоку після першого раптового розширення від d до D_{cep} :

$$n_1 = \frac{D_{cep}^2}{d^2} = \frac{\left(1 + \frac{D}{d}\right)^2}{4} = \frac{(1 + \sqrt{n})^2}{4}; \quad (9)$$

n – вихідний ступінь розширення потоку:

$$n = \frac{D^2}{d^2} = n_1 \cdot n_2; \quad (10)$$

n_2 – ступінь розширення потоку після другого раптового розширення від D_{cep} до D :

$$n_2 = \frac{D^2}{D_{cep}^2} = \frac{4}{\left(1 + \frac{d}{D}\right)^2} = \frac{4}{\left(1 + \frac{1}{\sqrt{n}}\right)^2}. \quad (11)$$

За аналогією з [5] вихідний ступінь розширення потоку можна подати так:

$$n = \frac{\left(1 + \frac{h}{D_{cep}}\right)^2}{\left(1 - \frac{h}{D_{cep}}\right)^2}. \quad (12)$$

Відносна довжина ділянки вирівнювання швидкості [8, с. 136] (друга підзона стабілізації профілю осередненої швидкості [1]):

$$L_1 \approx 10 \cdot \left(\sqrt{\omega_{Dc}} - \sqrt{\omega_d}\right), \quad (13)$$

де ω_{Dc} , ω_d – площа живого перерізу труби діаметром відповідно D_{cep} та d .

Формулу (13) можна подати так:

$$L_1/D_{cep} \approx 5 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \left(1 - 1/\sqrt{n_1}\right). \quad (14)$$

Відносна довжина ділянки після місцевого гідравлічного опору до перерізу, де коефіцієнт кінетичної енергії є мінімальним [9] (третья підзона стабілізації інтенсивності пульсацій швидкості [1]):

$$L_1/D_{cep} = 19 \cdot [1 - \exp(-0,6 \cdot \zeta_1)]. \quad (15)$$

Формула (8) дійсна за $\zeta_1 = 0,1 \dots 32,0$ [3].

Визначення коефіцієнта раптового розширення потоку.

Дослідження було проведено для раптових розширень потоку, наведених у табл. 1.

У [6] показано, що з похибкою близько $\approx 10\%$ значення експериментальних коефіцієнтів ζ відрізняються від обчислених за формулою

$$\zeta = \alpha_d \cdot (n - 1)^2, \quad (16)$$

де α_d – коефіцієнт кінетичної енергії у трубі діаметром d (рис. 1), для зони квадратичного опору $\alpha_d = 1,0$.

У табл. 2 наведено обчислені значення коефіцієнта β за формулою (2) та відносною довжини ділянки, обчисленої за формулами (8), (14), (15).

Як бачимо з табл. 2, за рахунок зменшення ступенів розширення потоку n_1 та n_2 порівняно зі ступенем n значення коефіцієнтів ζ_1 та ζ_2 є меншими, ніж ζ . А це підтверджує наведені в літературі дані, наприклад у [14], що порівняно з різким переходом ступінчастий перехід від труби з діаметром d до труби з діаметром D за раптового розширення потоку (рис. 1) зменшує гідравлічний опір.

Розрахунок коефіцієнта раптового розширення потоку

Ч/ч	Діаметр труб, мм			Ступінь розширення потоку n	Коефіцієнт місцевого гідралічного опору ζ	Використане джерело
	d	D	D _{сеп}			
1.	20,60	26,00	23,30	1,593	0,3565	досліди Карєва [10, рис. 28]
2.	15,12	20,62	17,87	1,860	0,6919	[11]
3.	—	—	—	2,045	0,9811	[12, рис. 2]
4.	10,07	15,12	12,60	2,254	1,5750	[11]
5.	20,90	35,50	28,20	2,885	3,7455	[13, рис. 1,а]
6.	8,00	14,00	11,00	3,063	4,1140	досліди Есканда [10, рис. 28]
7.	—	—	—	3,842	7,9547	[12, рис. 2]
8.	26,00	51,00	38,50	3,848	8,1676	досліди Карєва [10, рис. 28]

Таблиця 2

Розрахунок коефіцієнта β та відносної довжини $x_{R1}/D_{сеп}$, $L_1/D_{сеп}$

Ч/ч	Ступінь розширення потоку			Коефіцієнт раптового розширення потоку			Коефіцієнт β	Відносна довжина		
	n	n ₁	n ₂	$\zeta_{1+2}(n)$	$\zeta_1(n_1)$	$\zeta_2(n_2)$		$x_{R1}/D_{сеп}$	$L_1/D_{сеп}$ за формулою	
									(14)	(15)
1	1,593	1,279	1,245	0,3565	0,0778	0,0600	3,811	0,492	1,027	0,867
2	1,860	1,397	1,332	0,6919	0,1576	0,1102	3,691	0,654	1,364	1,714
3	2,045	1,476	1,385	0,9811	0,2266	0,1482	3,676	0,752	—	2,415
4	2,254	1,564	1,441	1,5750	0,3181	0,1945	4,340	0,852	1,777	3,301
5	2,885	1,821	1,585	3,7455	0,6740	0,3422	5,049	1,101	2,294	6,320
6	3,063	1,891	1,620	4,1140	0,7939	0,3844	4,698	1,159	2,417	7,200
7	3,842	2,191	1,754	7,9547	1,4185	0,5685	5,207	1,379	—	10,888
8	3,848	2,193	1,755	8,1676	1,4232	0,5700	5,338	1,380	2,877	10,911

За даними табл. 2 збудовано графік на рис. 2, з якого зрозуміло, що для даних, наведених в табл. 1, коефіцієнт β є більшим, ніж у дослідах [3, 9], де $\beta \leq 1,0$. Це відповідає моделі зони впливу місцевого гідралічного опору [1], оскільки відносна довжина $x_{R1}/D_{сеп}$ є дуже малою, що підтверджує рис. 3, позаяк значення відносної довжини $L_1/D_{сеп}$, обчислені за наближеною (13) чи (14) та точною (15) формулами, є більшими, ніж за формулою (8).

Для нашого випадку з похибкою не більше 5 % можна використати формули (14) та (15), але з іншим коефіцієнтом пропорційності, тобто

$$x_{R1} \approx 5 \cdot (\sqrt{\omega_{Dc}} - \sqrt{\omega_d}) \quad (17)$$

та

$$x_{R1}/D_{сеп} \approx 2,5 \cdot \sqrt{\pi} \cdot (1 - 1/\sqrt{n_1}) \quad (18)$$

Як бачимо з табл. 2 та рис. 2, коефіцієнт β зростає зі збільшенням ступеня розширення потоку n_1 та відносної довжини $x_{R1}/D_{сеп}$.

Залежність $\beta = \varphi(x_{R1}/D_{сеп})$ описано формулою (за $r = 0,9301$ та $S = 0,2751$):

$$\beta = 4,579 \cdot (x_{R1}/D_{сеп})^{0,386}, \quad (19)$$

а залежність $\beta = \psi(n_1)$ – формулою (за $r = 0,9434$ та $S = 0,2485$):

$$\beta = 3,042 \cdot n_1^{0,714}. \quad (20)$$

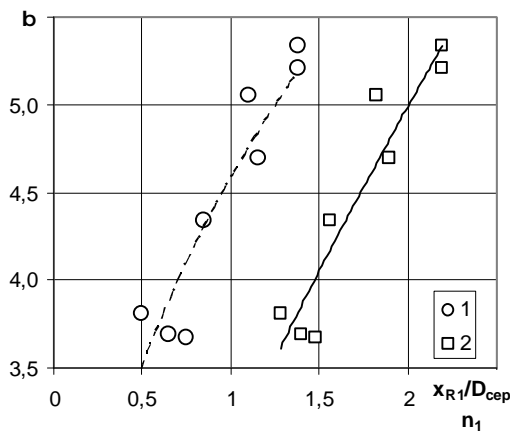


Рис. 2. Залежності
 $\beta = \varphi(x_{R1}/D_{cep}) - 1$ та $\beta = \psi(n_1) - 2$

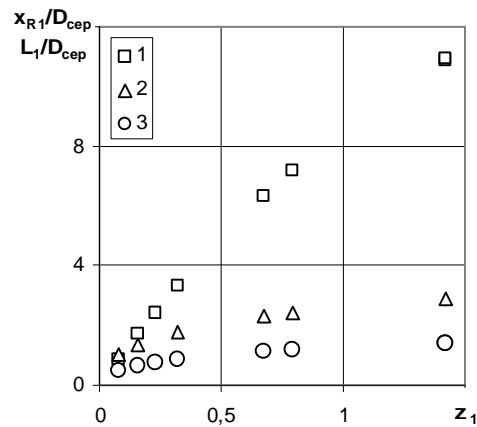


Рис. 3. Порівняння відносної довжини
 $L_1/D_{cep} = f(\zeta_1)$ за формулами (15) – 1 та (14) – 2
та $x_{R1}/D_{cep} = f(\zeta_1)$ за формулою (18) – 3

Висновки. Показано, що ступінчастий перехід від труби з діаметром d до труби з діаметром D за раптового розширення потоку порівняно з різким дає зменшення гідравлічного опору.

Одержано залежність коефіцієнта зміни місцевого гідравлічного опору β у формулі (2) як функцію відносної довжини ділянки між двома раптовими розширеннями потоку.

1. Петров А.С. О неоднородности зоны влияния местного сопротивления / А.С. Петров // Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – 1988. – Т.210. – С.64–69. 2. Степанов П.М. Справочник по гидравлике для мелиораторов / П.М. Степанов, И.Х. Овчаренко, Ю.А. Скобелъцын. – М.: Колос, 1984. – 207 с. 3. Гижса Е.А. Стабилизация напорных турбулентных потоков после местных сопротивлений: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.14.09 “Гидравлика и инженерная гидрология” / Е.А. Гижса. – К., 1986. – 21 с. 4. Турбулентность / [П. Брэдишоу, Т. Себеси, Г.-Г. Фернгольц и др.]; под ред. П. Брэдишоу. – М.: Машиностроение, 1980. – 343 с. 5. Повх И.Л. Гидродинамика труб переменного сечения / И.Л. Повх, Н.В. Финошин // Инж.-физ. журн. – 1992. – Т.62, № 4. – С.525–533. 6. Орел В.І. Коефіцієнт взаємовпливу опорів у разі раптового розширення труб / В.І. Орел // Вісник Нац. ун-ту “Львів. політехн.” “Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація”. – 2009. – № 659. – С.53–57. 7. Орел В. Втрати енергії на ділянках раптового розширення потоку у трубопровідних системах / В. Орел // Актуальні проблеми будівництва та інженерії доквілля: VI Міжнарод. наук. конф. – Львів–Кошице–Жешув. – Львів, 12–15 вересня 2001. – Ч.ІІ: Інженерія доквілля. – Львів, 2001. – С.105–110. 8. Жуковський С.С. Аеродинаміка вентиляції: навч. посіб. / С.С. Жуковський, В.Й. Лабай. – Львів: Вид-во Національного університету “Львівська політехніка”, 2003. – 372 с. 9. Гижса Е.А. Стабилизация турбулентных потоков после местных сопротивлений / Е.А. Гижса // Гидравлика и гидротехника: Республ. межведом. науч.-техн. сб. – 1986. – Вып.42. – С.93–96. 10. Альтигуль А.Д. Местные гидравлические сопротивления при движении вязких жидкостей / А.Д. Альтигуль. – М.: Гостоптехиздат, 1962. – 116 с. 11. Мандрус В.И. Сравнение методик экспериментальных исследований потерь при резком расширении потока жидкости / В.И. Мандрус, И.В. Бакулин, Л.И. Пилипак; Львов. политехн. ин-т. – Львов, 1988. – 10 с. – Деп. в УкрНИИНТИ 30.01.89 г. – № 426. – Ук89. 12. Альтигуль А.Д. Экспериментальное исследование зависимости коэффициента сопротивления при внезапном расширении потока от числа Рейнольдса / А.Д. Альтигуль, Э.С. Арзуманов, Р.Е. Везирян // Нефтяное хозяйство. – 1967. – № 4. – С.53–55. 13. Иванюта Ю.Ф. Исследование влияния добавок полимера на величину коэффициента местного сопротивления / Ю.Ф. Иванюта, Л.А. Чекалова // Инж.-физ. журн. – 1974. – Т. XXVI, № 6. – С.965–971. 14. А.с. 1681072 СССР, МКИ F 15D 1/02. Устройство для снижения гидравлических потерь в ступенчато расширяющихся трубопроводах / Р.С. Гурбанов, С.И. Бахтияров, Т.С. Сулейманов (СССР). – № 4653928/29; заявл. 19.12.88; опубл. 30.09.91, Бюл. № 36.