

**КОЕФІЦІЄНТ ВЗАЄМОВПЛИВУ ОПОРІВ
У РАЗІ РАПТОВОГО РОЗШИРЕННЯ ТРУБ**

© Орел В.І., 2009

Запропоновано залежність коефіцієнта у формулі (1) як функцію довжини ділянки між двома раптовими розширеннями потоку, які розташовані один від одного приблизно в межах довжини початкової ділянки струменя.

The dependence of coefficient in the formula (1) 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.

Вступ. Два близько розташовані (в межах ділянки стабілізації епюри швидкостей) місцеві гідравлічні опори здійснюють один на другий взаємний вплив. Загальні втрати напору можуть відрізнитися від суми втрат на кожному з них. Так, сумарний коефіцієнт місцевого гідравлічного опору для запірних пристроїв при $Re > 500$ обчислюють за формулою Скобельцина і Хомутова [1, с. 38; 2, с. 53]:

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

де k_1 – коефіцієнт взаємовпливу опорів, який залежить від довжини ділянки між двома місцевими гідравлічними опорами [2, с.53]; для ділянки стабілізації епюри швидкостей довжиною L коефіцієнт k_1 наведено в табл. 1

Таблиця 1

Залежність $k_1 = f(L/d)$

L/d	10	20	30	40	50
k_1	0,72	0,82	0,90	0,96	1,00

Формулу (1) можна використовувати для орієнтовних розрахунків і для інших місцевих гідравлічних опорів у разі їхнього взаємного впливу [1, с. 38].

До того ж сумарний коефіцієнт ζ_{1-2} може бути як більшим, так і меншим від суми коефіцієнтів ($\zeta_1 + \zeta_2$) залежно від довжини ділянки між двома місцевими гідравлічними опорами [3, с. 220].

Аналіз останніх досліджень. Згідно з моделлю [4], коефіцієнт раптового розширення труби обчислюють за формулою

$$\zeta = \frac{4}{D_{\text{сер}} \cdot \left(d + \frac{D-d}{k+1} \right) \cdot \frac{\rho V_d^2}{2}} \cdot \left\{ \frac{4\rho Q^2}{\pi^2} \cdot \left(\frac{1}{d^2} - \frac{1}{D^2} \right) - \frac{\Delta p}{4} \cdot \left[d^2 + \frac{4d \cdot (D-d)}{(k+1) \cdot (k+2)} + \frac{(D-d)^2}{(2k+1) \cdot (k+1)} \right] \right\} \quad (2)$$

де $D_{\text{сер}}$ – середній за поверхнею струменя діаметр (рис. 1);

k – показник степеня в формулі зміни діаметра (рис. 1)

$$D(x) = d + (D-d) \cdot \left(\frac{x}{x_R} \right)^k; \quad (3)$$

x_R – довжина ділянки повторного приєднання потоку (рис. 1);

x – поточна координата.

З похибкою не більше 8,1% діаметр $D_{\text{сеп}}$ пропонується [5] визначати як середній арифметичний між діаметрами d та D (рис. 1), тобто

$$D_{\text{сеп}} = 1/2 \cdot (d + D) . \quad (4)$$

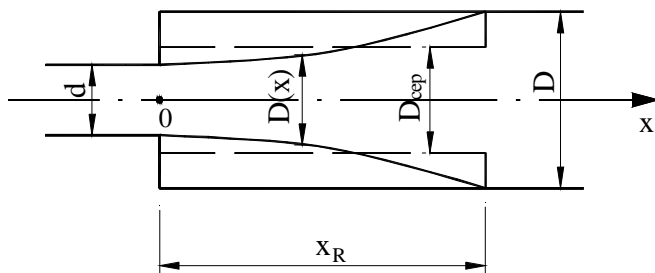


Рис. 1. Схема моделі струменя рідини у разі раптового розширення потоку [4]

Тоді раптове розширення можна розглядати таким, що замінюється двома місцевими гідравлічними опорами з відповідними ступенями розширення потоку:

$$n_1 = \frac{D_{\text{сеп}}^2}{d^2} = \frac{\left(1 + \frac{D}{d}\right)^2}{4} = \frac{(1 + \sqrt{n})^2}{4} ; \quad (5)$$

$$n_2 = \frac{D^2}{D_{\text{сеп}}^2} = \frac{4}{\left(1 + \frac{d}{D}\right)^2} = \frac{4}{\left(1 + \frac{1}{\sqrt{n}}\right)^2} , \quad (6)$$

де n – вихідний ступінь розширення потоку,

$$n = \frac{D^2}{d^2} = n_1 \cdot n_2 . \quad (7)$$

Втрати енергії на раптовому розширенні труби включають тиск, втрачений на ділянках повторного приєднання потоку рідини x_R (рис. 1) та стабілізації епюри швидкостей. Прийmemo довжину ділянки місцевого гідравлічного опору зі ступенем розширення n такою, що дорівнює x_R [4]. Тоді відстань між двома раптовими розширеннями потоку є завдовжки $(x_R - x_{R1})$, де x_{R1} – довжина ділянки приєднання потоку після першого раптового розширення.

Відомо, що при малих значеннях ступеня розкриття D/d (згідно з [6], $D/d < 1,72$, тобто $n < 2,958$) розвиток циркуляційної течії відбувається в межах початкової ділянки струменя (що містить ядро потоку), довжина якої при $D/d < 1,87$ (тобто $n < 3,497$) приблизно дорівнює довжині ділянки x_R [7, с. 92].

Довжина ділянки повторного приєднання потоку практично не залежить від числа Рейнольдса в діапазоні зміни $Re_d = (0,1 \dots 100) \cdot 10^4$ [8, с.13], становлячи:

$$x_R/d = (4,0 \pm 1,0) \cdot (D/d - 1) = (4,0 \pm 1,0) \cdot (\sqrt{n} - 1) . \quad (8)$$

А при $1,3 \leq D/d \leq 2,5$ (що відповідає $1,69 \leq n \leq 6,25$) приймають [9]:

$$x_R/d = (4,25 \pm 0,25) \cdot (D/d - 1) = (4,25 \pm 0,25) \cdot (\sqrt{n} - 1) . \quad (9)$$

З формул (8) та (9) очевидно, що $x_{R1} = 0,5 \cdot x_R$. Тоді відстань між двома раптовими розширеннями потоку $(x_R - x_{R1}) = 0,5 \cdot x_R$. У розрахунках приймаємо

$$x_{R1}/d = 4,25 \cdot (\sqrt{n_1} - 1) = 2,125 \cdot (\sqrt{n} - 1) . \quad (10)$$

Мета дослідження. Метою роботи є дослідження взаємного впливу двох раптових розширень, якими замінено вихідний місцевий гідравлічний опір, що перебувають на відстані один

від одного в межах початкової ділянки струменя. Для досягнення поставленої мети необхідно визначити коефіцієнт $k_1 = \varphi(x_{R1}/d)$.

Обчислення коефіцієнта $k_1 = \varphi(x_{R1}/d)$. Розглянемо раптові розширення потоку, що їх наведено в табл. 2. Коефіцієнт гідравлічного опору обчислювали за формулою

$$\zeta = \alpha_d \cdot \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2, \quad (11)$$

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

Як очевидно з табл. 1, при $n = 1,593 \dots 3,848$ значення коефіцієнтів ζ , визначені експериментально та обчислені за формулою (1), відрізняються в межах до $\approx 10\%$. Тому коефіцієнти $\zeta_1 = f_1(n_1)$ та $\zeta_2 = f_2(n_2)$ розраховуємо за формулою (11), а коефіцієнт k_1 – згідно з формулою (1). Розрахунок зведено в табл. 3.

Таблиця 2

Розрахунок коефіцієнта раптового розширення потоку

Ч/ч	Діаметр руб. мм		Ступінь розширення потоку n	Використане джерело	Коефіцієнт ζ		Похибка, %, при обчисленні ζ за формулою (11)
	d	D			визначений експериментально	обчислений за формулою (11)	
1.	20,6	26,0	1,593	[10, рис. 28] дослід Карєва	0,1405	0,1386	+1,35%
2.	15,12	20,62	1,860	[11]	0,2000	0,2138	+6,5%
3.	—	—	2,045	[12, рис. 2]	0,2346	0,2611	+10,15%
4.	10,07	15,12	2,254	[11]	0,3100	0,3095	-0,2%
5.	20,9	35,5	2,885	[13, рис. 1,а]	0,4500	0,4269	-5,4%
6.	8,0	14,0	3,063	[10, рис. 28] дослід Есканда	0,4385	0,4536	+3,3%
7.	—	—	3,842	[12, рис. 2]	0,5389	0,5472	+1,5%
8.	26,0	51,0	3,848	[10, рис. 28] дослід Карєва	0,5516	0,5478	-0,7%

Таблиця 3

Розрахунок коефіцієнта k та відносної довжини x_{R1}/d

Ч/ч	Ступінь розширення потоку			Коефіцієнт раптового розширення			Коефіцієнт k_1	Відносна довжина x_{R1}/d
	n	n_1	n_2	$\zeta_{1+2}(n)$	$\zeta_1(n_1)$	$\zeta_2(n_2)$		
1.	1,593	1,279	1,245	0,1405	0,0476	0,0387	1,628	0,557
2.	1,860	1,397	1,332	0,2000	0,0808	0,0621	1,400	0,773
3.	2,045	1,476	1,385	0,2346	0,1040	0,0773	1,294	0,914
4.	2,254	1,564	1,441	0,3100	0,1300	0,0937	1,386	1,065
5.	2,885	1,821	1,585	0,4500	0,2033	0,1362	1,325	1,484
6.	3,063	1,891	1,620	0,4385	0,2220	0,1465	1,190	1,594
7.	3,842	2,191	1,754	0,5389	0,2955	0,1848	1,122	2,040
8.	3,848	2,193	1,755	0,5516	0,2959	0,1851	1,147	2,043

Відносну довжину ділянки між двома раптовими розширеннями потоку x_{R1}/d обчислюємо за формулою (10). Розрахунок наведено в табл. 2, за даними якої на рис. 2 одержано залежність, що її описано формулою (при $r = 0,929$ та $S = 0,0653$):

$$k_1 = \frac{1,36}{(x_{R1}/d)^{0,242}}. \quad (12)$$

Оскільки, згідно з формулою (10), $x_{R1}/d = \psi(n_1)$, то за даними табл. 2, що показано на рис. 2, маємо (при $r = 0,9015$ та $S = 0,0716$):

$$k_1 = \frac{1,702}{\sqrt{n_1}}. \quad (13)$$

Як очевидно з табл. 3 та рис. 2, коефіцієнт k_1 зменшується зі збільшенням ступеня розширення потоку n та відносної довжини x_{R1}/d .

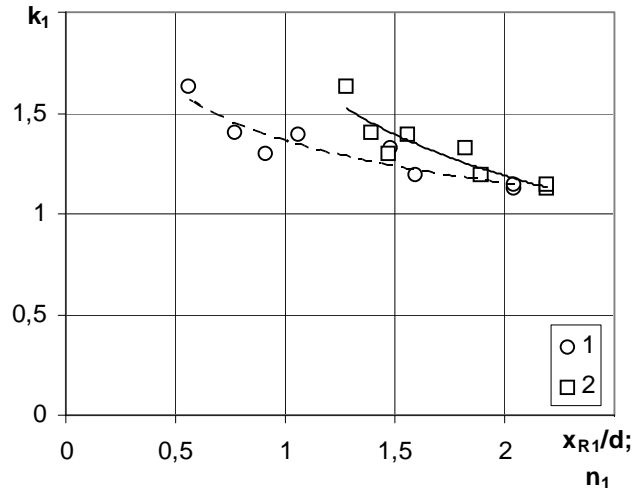


Рис. 2. Залежності $k_1 = \varphi(x_{R1}/d) - 1$ та $k_1 = \psi(n_1) - 2$

Це можна пояснити так. Струмінь рідини, який втікає в канал з діаметром D , взаємодіє з турбулізованим [7, с.40], тобто зі збуреним навколишнім середовищем, яке має високий власний рівень турбулентних пульсацій швидкості [7, с.19]. Крім того, на ділянках потоку, що розширюються, рух відбувається від перерізу з меншим тиском до перерізу з більшим, тобто з додатним градієнтом тиску. Цей протитиск затрудняє поступальний рух частинок рідини [14, с.118]. Тоді на першому раптовому розширенні потоку для подолання наведених ефектів необхідно більше енергії, ніж у трубопроводі сталого перерізу між двома місцевими гідравлічними опорами [3, с.221], що й пояснює значення $k_1 > 1,0$. Адже коефіцієнт ζ_1 зростає порівняно з відповідним значенням, коли цей місцевий гідравлічний опір є один. Найкраще це можна описати формулою [14, с.123]:

$$\zeta_{1-2} = \beta \cdot \zeta_1 + \zeta_2, \quad (14)$$

де β – коефіцієнт зміни значення ζ_1 ; у нашому випадку має бути $\beta > 1,0$.

Порівняємо залежності $k_1 = f(L/d)$ та $k_1 = \varphi(x_{R1}/d)$, які наведено на рис. 3. Екстраполювавши їх до перетину між собою, одержуємо, що мінімум k_1 є на відстані $L/d \approx 4$. Це узгоджується з дослідженнями Жданова з двома послідовно розташованими відводами ($\alpha = 90^\circ$), де екстремум k_1 був при $L/d = 5$ [3, с.222].

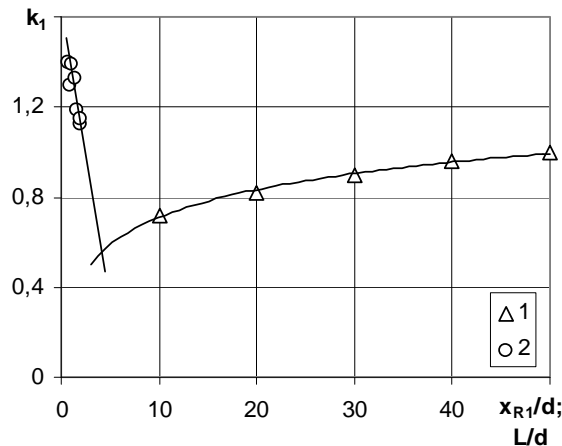


Рис. 3. Порівняння залежностей $k_1 = f(L/d) - 1$ та $k_1 = \varphi(x_{R1}/d) - 2$

Висновки. Одержано залежність коефіцієнта взаємовпливу опорів k_1 у формулі (1) як функцію довжини ділянки між двома раптовими розширеннями потоку, якими замінено вихідний місцевий гідравлічний опір, що перебувають один від одного приблизно в межах довжини початкової ділянки струменя. Показано, що ця залежність є спадною на відміну від тієї, яка враховує довжину ділянки стабілізації епюри швидкостей.

1. *Справочник по гидравлике для мелиораторов* / П.М. Степанов, И.Х. Овчаренко, Ю.А. Скобельцын. – М.: Колос, 1984. – 207 с. 2. Луценко В.В. *Технічна механіка рідини і газу: Навч. посібник.* – Рівне: НУВГП, 2008. – 128 с. 3. Альтигуль А.Д., Животовский Л.С., Иванов Л.П. *Гидравлика и аэродинамика: Учеб. для вузов.* – М.: Стройиздат, 1987. – 414 с. 4. Иньков А.П., Ярхо С.А. *К расчету местных коэффициентов гидравлического сопротивления* // *Науч. тр. Всес. заочн. машиностроит. ин-та.* – 1973. – Вып.9. – С. 167–176. 5. Орел Вадим. *Втрати енергії на ділянках раптового розширення потоку у трубопровідних системах* // *Актуальні проблеми будівництва та інженерії доквілля: VI міжнародна наук. конф. Львів–Кошице–Жешув. Львів, 12–15 вересня 2001. Ч. II. Інженерія доквілля.* – Львів, 2001. – С. 105–110. 6. Кталхерман М.Г. *Исследование турбулентных отрывных течений в канале, структура потока и теплопередача: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / ИТПМ СО АН СССР.* – Новосибирск, 1970. 7. *Турбулентные струйные течения в каналах* / В.Е. Алемасов, Г.А. Глебов, А.П. Козлов, А.Н. Щёлков. – Казань: Казанский филиал АН СССР, 1988. – 172 с. 8. Назарчук М.М., Панченко В.Н. *Ограниченные струи.* – Киев: Наук. думка, 1981. – 212 с. 9. *Турбулентность* / П. Брэдишоу, Т. Себеси, Г.-Г. Фернгольц и др.; Под ред. П. Брэдишоу. – М.: Машиностроение, 1980. – 343 с. 10. Альтигуль А.Д. *Местные гидравлические сопротивления при движении вязких жидкостей.* – М.: Гостоптехиздат, 1962. – 116 с. 11. Мандрус В.И., Бакулин И.В., Пилипяк Л.И. *Сравнение методик экспериментальных исследований потерь при резком расширении потока жидкости* / Львов. политехн. ин-т. – Львов, 1988. – 10 с. (Деп. в УкрНИИИТИ 30.01.89 г. – № 426. – Ук89.). 12. Альтигуль А.Д., Арзуманов Э.С., Везирян Р.Е. *Экспериментальное исследование зависимости коэффициента сопротивления при внезапном расширении потока от числа Рейнольдса* // *Нефтяное хозяйство.* – 1967. – № 4. – С. 53–55. 13. Иванюта Ю.Ф., Чекалова Л.А. *Исследование влияния добавок полимера на величину коэффициента местного сопротивления* // *Инж.-физ. журн.* – 1974. – Т. XXVI, № 6. – С. 965–971. 14. Константинов Ю.М., Гіжа О.О. *Технічна механіка рідини і газу. Підручник.* – К.: Вища шк., 2002. – 277 с.