

**В.І. Орел, М.І. Стащак**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра гідравліки та сантехніки

**А.Я. Куліченко**

Львівська філія

Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту

## ВИКОРИСТАННЯ РАПТОВОГО РОЗШИРЕННЯ ТРУБИ ЯК ВИТРАТОМІРА ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ

© Орел В.І., Стащак М.І., Куліченко А.Я., 2011

Одержано, що для ньютонівської рідини за однакових витрат та перепадів тиску на раптовому розширенні труби в автотельній області турбулентного режиму руху нерівномірність розподілу швидкостей по перерізу труби малого діаметра практично не впливає (з відносною похибкою до 10%) на результат вимірювання витрати рідини за методом змінного перепаду тиску.

Ключові слова: раптове розширення труби, змінний перепад тиску, коефіцієнт витрати.

For Newtonian liquid under the identical flow rate and pressure drop of sudden expansion pipe in the “rough-pipe” turbulent flow the unevenness of distributing of velocities in cross-section of small diameter pipe virtually no effect (with a relative error to 10%) the result of fluid flow measurement using variable pressure drop method is obtained.

Key words: sudden expansion of pipe, variable pressure drop, discharge coefficient.

### Вступ

Вимірювання витрати рідини методом змінного перепаду тиску засновано на залежності перепаду тиску від витрати рідини. За цим методом використовують діафрагми, за допомогою яких вимірювання витрати закладено в стандарті [1].

У [2] пропонується використовувати раптове розширення потоку рідини як витратомір змінного перепаду тиску, що не потребує встановлення в трубопровід додаткових елементів.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

З рівняння Бернуллі для потоку реальної рідини для перерізів входу потоку з труби меншого діаметра у трубу більшого діаметра та приєднання струменя рідини у трубі більшого діаметра (рис. 1) у припущенні, що дотичні напруги на стінці труби між цими перерізами дорівнюють нулю та густина рідини є постійною, було одержано формулу для обчислення витрати рідини [2]:

$$Q = \mu' \cdot \omega_2 \cdot \sqrt{2g \cdot \frac{p_2' - p_1'}{\rho g}}, \quad (1)$$

де  $\mu'$  – коефіцієнт витрати,

$$\mu' = \sqrt{\frac{\Psi}{\alpha_1 \cdot n^2 - \alpha_2 - \zeta_2}}, \quad (2)$$

$\psi$  – коефіцієнт відбору, який враховує, що точки відбору тисків  $p'_1$  та  $p'_2$  можуть не збігатися з вказаними перерізами 1–1 та 2–2 (рис. 1),

$$\psi = \frac{p_2 - p_1}{p'_2 - p'_1}, \quad (3)$$

$\alpha_1, \alpha_2$  – коефіцієнт кінетичної енергії у трубі відповідно малого та великого діаметра;  $n$  – ступінь розширення труби,

$$n = \omega_2/\omega_1, \quad (4)$$

$\omega_1, \omega_2$  – площа поперечного перерізу труби відповідно малого та великого діаметра, для круглої труби діаметром  $d_1$  площа  $\omega_1 = 1/4 \cdot \pi d_1^2$ ;  $\zeta_2$  – коефіцієнт опору раптового розширення, віднесений до швидкості в трубі великого діаметра.

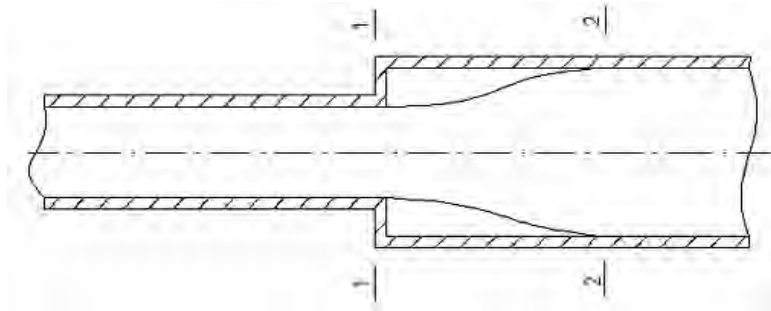


Рис. 1. Схема раптового розширення труби [2]

У [2] розглядається рівномірний розподіл швидкостей у вказаних перерізах.

Коефіцієнт опору раптового розширення труби у разі рівномірного розподілу швидкостей по перерізу труби малого діаметра і турбулентної течії ( $Re > 10^4$ ) для ньютонівської рідини розраховують за формулою Борда-Карно [3, с. 41]:

$$\zeta_2 = \alpha_1 \cdot (n - 1)^2. \quad (5)$$

Коефіцієнт витрати у цьому разі

$$\mu' = \sqrt{\frac{\psi}{(2n - 1) \cdot \alpha_1 - \alpha_2}}. \quad (6)$$

Якщо вважати, що коефіцієнти кінетичної енергії  $\alpha_1 \approx 1,0$  та  $\alpha_2 \approx 1,0$ , тобто рівномірний розподіл швидкостей в перерізах 1–1 та 2–2 (рис. 1), тоді формулу (6) можна переписати так:

$$\mu' = \sqrt{\frac{\psi}{2 \cdot (n - 1)}}. \quad (7)$$

У реальних умовах розподіл швидкостей на ділянці перед раптовим розширенням, як правило, не буває рівномірним. Це істотно підвищує втрати напору порівняно з розрахованими за формулою Борда-Карно (5).

### Мета та завдання досліджень

Метою роботи є одержання залежності витрати рідини від перепаду тиску на раптовому розширенні труби у разі нерівномірного розподілу швидкостей за умови турбулентного режиму руху.

Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати наявні в літературі формули та зробити висновок щодо можливості їх використання.

### Аналіз витрати рідини у разі нерівномірного розподілу швидкостей

Розподіл швидкостей при вході в трубу великого діаметра за степеневим законом [4, с. 147]:

$$\frac{u}{u_{\max}} = \left(1 - \frac{r}{r_o}\right)^{1/m}, \quad (8)$$

де  $u, u_{\max}$  – відповідно локальна швидкість у деякій точці і максимальна швидкість на осі, м/с;  $r, r_o$  – відповідно відстань від осі труби до цієї точки та радіус труби, м;  $m$  – показник степеня,  $m = 1 \dots \infty$ .

Тоді коефіцієнт опору раптового розширення труби, віднесений до швидкості в трубі меншого діаметра [4, с. 146]:

$$\zeta_1 = \frac{1}{n^2} + \alpha_1 - \frac{2\alpha_{o1}}{n} . \quad (9)$$

Перепишемо формулу (9) для коефіцієнта опору раптового розширення труби, віднесеного до швидкості в трубі більшого діаметра:

$$\zeta_2 = 1 + \alpha_1 \cdot n^2 - 2\alpha_{o1} \cdot n . \quad (10)$$

У формулах (9) та (10) коефіцієнт кінетичної енергії

$$\alpha_1 = \frac{(2m+1)^3 \cdot (m+1)^3}{4m^4 \cdot (2m+3) \cdot (m+3)} , \quad (11)$$

а коефіцієнт кількості руху в трубі меншого діаметра

$$\alpha_{o1} = \frac{(2m+1)^2 \cdot (m+1)}{4m^2 \cdot (m+2)} . \quad (12)$$

При  $m = \infty$  профіль швидкості (8) має форму прямокутника, тобто розподіл швидкостей по перерізу є рівномірним. Практично профіль швидкостей, близький до прямокутного, стає вже при  $m = 8 \dots 10$  [4, с. 147].

Показник степеня  $m$  зростає зі збільшенням критерію Рейнольдса  $Re$  [5, с. 277, 280], що наведено в табл. 1.

Таблиця 1

**Залежність  $m = f(Re)$  [5, с.277, 280]**

Показник степеня $m$	7,0	8,5	8,8	9,8	10,0
Критерій Рейнольдса $Re$	$1,1 \cdot 10^5$	$4,0 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^6$

У формулах (2) та (6) невідомим є коефіцієнт кінетичної енергії  $\alpha_2$  у трубі великого діаметра. Одержимо формулу для його обчислення.

Розглянемо течію ньютонівської рідини в автомобільній області турбулентного режиму руху, тобто при  $\lambda_1 \neq \varphi(Re_1)$ . Припустімо однакову еквівалентну шорсткість стінок труб, які утворюють раптове розширення, тобто  $\Delta_{e1} = \Delta_{e2}$ . Тоді з формули Шифрінсона для коефіцієнта гідравлічного тертя [3, с. 65]:

$$\lambda_i = 0,11 \cdot \left( \frac{\Delta_{ei}}{d_i} \right)^{0,25} \quad (13)$$

з урахуванням формули (4) одержимо

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{d_2^{0,25}}{d_1^{0,25}} = n^{0,125} . \quad (14)$$

З іншого боку, якщо прийняти коефіцієнт кінетичної енергії за формулою Альтшуля [3, с. 36]:

$$\alpha_i = 1,0 + 2,65 \cdot \lambda_i , \quad (15)$$

одержимо:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{\alpha_1 - 1,0}{\alpha_2 - 1,0} . \quad (16)$$

Прирівнявши формули (14) та (16), маємо:

$$\alpha_2 = 1,0 + \frac{\alpha_1 - 1,0}{n^{0,125}} . \quad (17)$$

Вважаючи, витрату рідини та перепад тиску за рівномірного та нерівномірного розподілу швидкостей по перерізу труби малого діаметра однаковими, визначимо коефіцієнт витрати

відповідно за формулами (7) та (2) при  $\psi = 1,0$ . У разі збільшення ступеня розширення труби коефіцієнт витрати зменшується. Використання формули (7) можливе тільки з найменшим ступенем розширення труби  $n = 1,5$  (співвідношенням діаметрів  $d_2/d_1 = 1,225$ ), оскільки тоді  $\mu' = 1,0$ .

Відносна похибка обчислення коефіцієнта витрати не перевищує 10 % за співвідношення діаметрів  $d_2/d_1 \leq 3,0$  (тобто при  $n = 9,0$ ), що наведено в табл. 2. Саме тоді розподіл швидкостей не впливає на результат обчислення витрати рідини. За результатами табл. 2 побудовано графік на рис. 2.

Таблиця 2

**Коефіцієнт витрати за рівномірного та нерівномірного розподілів швидкостей при  $D/d = 3,0$  ( $n = 9,0$ )**

Ч/ч	Показник степеня $m$ у формулі (8)	Коефіцієнт витрати $\mu'$ за формулою		Відносна похибка обчислення коефіцієнта витрати, %
		(2)	(7)	
1.	8,0	0,250	0,225	9,8
2.	8,5	0,250	0,228	9,0
3.	9,0	0,250	0,230	8,2
4.	9,5	0,250	0,231	7,5
5.	10,0	0,250	0,233	6,9

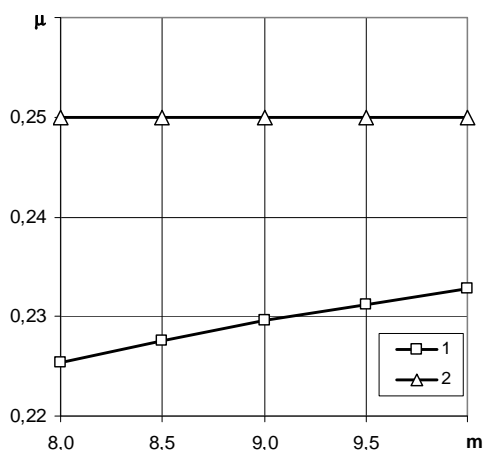


Рис. 2. Залежність  $\mu = f_2(m)$  за формулами (2) – 1 та (7) – 2

Проте, для кожного конкретного раптового розширення є своя залежність  $\zeta_2 \neq \psi(\text{Re}_2)$ , коли місцевий гідравлічний опір вже не можна використовувати як витратомір змінного перепаду тиску.

**Висновки**

Одержано, що для ньютонівської рідини в автотельній області турбулентного режиму руху нерівномірність розподілу швидкостей на вході в раптове розширення труби практично не впливає (з відносною похибкою до 10%) на результат вимірювання витрати рідини за методом змінного перепаду тиску.

1. ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2007 ИСО 5167-2:2003. Вимірювання витрати та кількості рідини і газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 2. Діафрагми. Технічні вимоги. 2. Даев Ж.А. Применение расширения русла в качестве чувствительного элемента расходомера переменного перепада давления / Ж.А. Даев, Л.Н. Латышев // Нефтегазовое дело. – 2009. – 9 с. – Режим доступу: [www.ogbu.s.ru](http://www.ogbu.s.ru). 3. Справочник по гидравлике / Под ред. В.А. Большакова. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1 984. – 343 с. 4. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик; Под ред. М.О. Штейнберга. – М.: Машиностроение, 199 2. – 6 72 с. 5. Повх И.Л. Техническая гидродинамика / И.Л. Повх. – Л.: Машиностроение, 1976. – 504 с.