

Л. Лесовой, Р. Федоришин

Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра автоматизації теплових та хімічних процесів

ВИЗНАЧЕННЯ ПОПРАВКОВОГО КОЕФІЦІЄНТА НА ШОРСТКІСТЬ ВНУТРІШНЬОЇ ПОВЕРХНІ ТРУБОПРОВОДУ ПІД ЧАС ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ГАЗУ

© Лесовой Л., Федоришин Р., 2005

The existing techniques for calculation of roughness correction coefficient are considered in the paper. New analytical dependences for calculation of subsidiary values of the roughness correction coefficient are proposed. Tables and graphs are given to compare the derived values with experimental data.

Постановка проблеми. Внаслідок того, що деякі труби не задовольняють вимогам щодо шорсткості їх внутрішньої поверхні, потрібно враховувати вплив цієї шорсткості на значення витрати. Велика шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу призводить до зменшення тиску перед діафрагмою, внаслідок чого перепад тиску зменшується і значення витрати виходить меншим, ніж воно є насправді. Причому тим меншим, чим більшим є відносний діаметр отвору звужувального пристрою, число Рейнольдса і сама шорсткість. Шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу залежить від матеріалу трубопроводу, способу його виготовлення, властивостей транспортованого середовища, терміну експлуатації. За формою, розмірами і розподілом на внутрішній поверхні трубопроводу шорсткість, з якою зустрічаються на практиці, є нерівномірною. Відношення коефіцієнта витікання для вимірювального трубопроводу з шорсткою внутрішньою поверхнею до коефіцієнта витікання для вимірювального трубопроводу з гладкою внутрішньою поверхнею називають поправковим коефіцієнтом на шорсткість $K_{ш}$. Вплив шорсткості вимірювального трубопроводу на значення витрати враховують домноженням коефіцієнта витікання на поправковий коефіцієнт $K_{ш}$. Формули для визначення поправкового коефіцієнта $K_{ш}$ отримуються на основі експериментальних даних.

Аналіз останніх досягнень. Відповідно до [1] поправковий коефіцієнт на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу перед діафрагмою визначається так:

$$K_{ш} = \begin{cases} 1 & \text{для } A_{ш} \leq (A_{ш})_{дон} \text{ або } Re < 10^4; \\ 1 + \beta^4 \cdot \frac{r_0}{100} \left(1 - \frac{(\lg(Re) - 6)^2}{4} \right) & \text{для } (A_{ш})_{дон} < A_{ш} < 40 \text{ і } 10^4 \leq Re < 10^6; \\ 1 + \beta^4 \cdot \frac{r_0}{100} & \text{для } (A_{ш})_{дон} < A_{ш} < 40 \text{ і } 10^6 \leq Re, \end{cases} \quad (1)$$

де β – відносний діаметр; r_0 – допоміжний коефіцієнт;

Re – число Рейнольдса;

 $A_{ш}$ – відносна шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу перед діафрагмою; $(A_{ш})_{дон}$ – допустима відносна шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу перед діафрагмою.

Відносна шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу перед діафрагмою розраховується за формулою

Таблиця 1

Експериментальні дані залежності $(A_{ш})_{доп}$ від β^2 [4]

β^2	0,074	0,100	0,150	0,200	0,300	0,400	0,500	0,600	0,640
$(A_{ш})_{доп}$	38,0	20,0	8,7	6,3	4,7	4,2	4,0	3,9	3,9

Порівняння обчислених значень $(A_{ш})_{доп}$ за формулами (4) і (6) з експериментальними даними наведені в табл. 2, а також показані у вигляді графіків на рис. 2 і 3.

Таблиця 2

Значення та відносні похибки залежності $(A_{ш})_{доп}$ від β^2

β	β^2	Експериментальні значення [4]	Формула (4)		Формула (6)	
			$(A_{ш})_{доп}$	$\delta_{(A_{ш})_{доп}}, \%$	$(A_{ш})_{доп}$	$\delta_{(A_{ш})_{доп}}, \%$
0,2720	0,074	38,0	75,1314	97,71	38,4315	1,14
0,3162	0,100	20,0	19,3181	-3,41	19,7300	-1,35
0,3873	0,150	8,7	7,7425	-11,01	9,0828	4,40
0,4472	0,200	6,3	5,6237	-10,74	6,1721	-2,03
0,5477	0,300	4,7	4,4751	-4,78	4,5731	-2,70
0,6325	0,400	4,2	4,1310	-1,64	4,1631	-0,88
0,7071	0,500	4,0	3,9811	-0,47	4,0137	0,34
0,7746	0,600	3,9	3,9018	0,05	3,9467	1,20
0,8000	0,640	3,9	3,8803	-0,50	3,9304	0,78

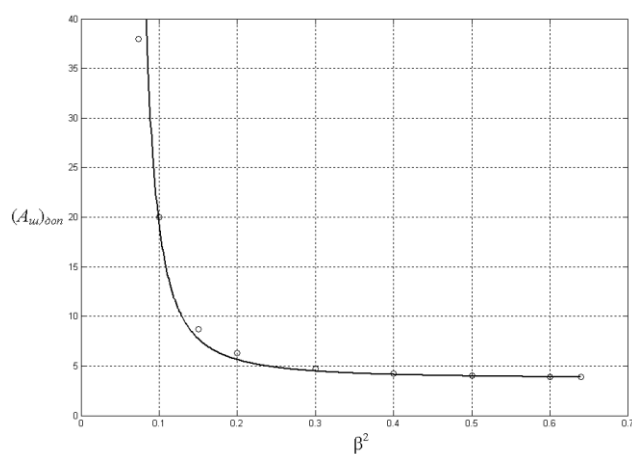


Рис. 2. Залежність $(A_{ш})_{доп}=f(\beta^2)$:
 ◦ – експериментальні точки [4];
 — – крива за формулою (4)

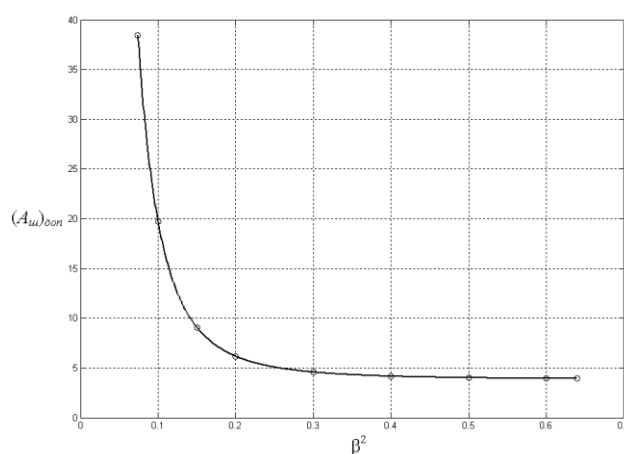


Рис. 3. Залежність $(A_{ш})_{доп}=f(\beta^2)$:
 ◦ – експериментальні точки [4];
 — – крива за формулою (6)

У [3] наведені експериментальні дані залежності r_0 від $A_{ш}$. Ці дані наведені і у табл. 3 та показані на рис. 4.

Таблиця 3

Експериментальні дані залежності r_0 від $A_{ш}$ [3]

$A_{ш}$	3,5938	4	5	6	7	8	9	10	20	30
r_0	0,00	0,25	0,80	1,31	1,76	2,13	2,50	2,80	5,00	6,81

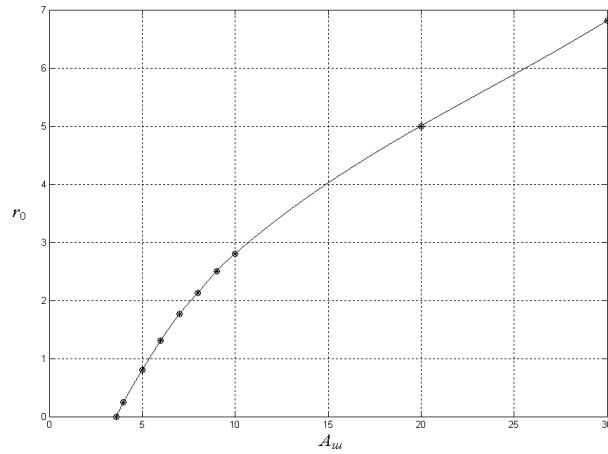


Рис. 4. Експериментальні точки залежності r_0 від $A_{ш}$ [3]

Порівняння обчислених значень r_0 за формулами (5) і (7) з експериментальними даними наведені в табл. 4, а також показані у вигляді графіків на рис. 5 і 6.

Таблиця 4

Значення та відносні похибки залежності r_0 від $A_{ш}$

$A_{ш}$	Експериментальні дані [3]	Формула (5)		Формула (7)	
	r_0	r_0	$\delta_{r_0}, \%$	r_0	$\delta_{r_0}, \%$
3,5938	0,00	-0,1111	-	0,0108	-
4	0,25	0,2144	-14,23	0,2608	4,31
5	0,80	0,8928	11,60	0,8222	2,78
6	1,31	1,4471	10,46	1,3154	0,42
7	1,76	1,9157	8,85	1,7502	-0,56
8	2,13	2,3216	9,00	2,1353	0,25
9	2,50	2,6797	7,19	2,4787	-0,85
10	2,80	3,0000	7,14	2,7874	-0,45
20	5,00	5,1072	2,14	5,0018	0,04
30	6,81	6,3398	-6,90	6,8779	1,00

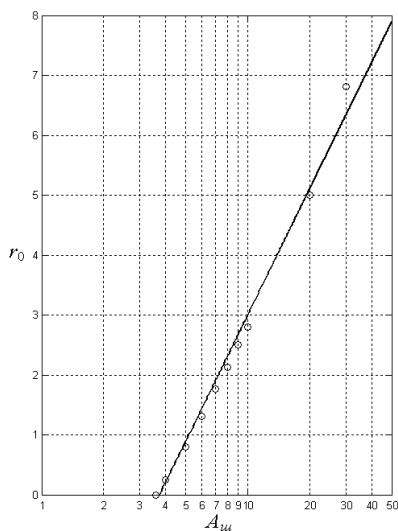


Рис. 5. Залежність $r_0=f(A_{ш})$:
 ◦ – експериментальні точки [3];
 — – крива за формулою (5)

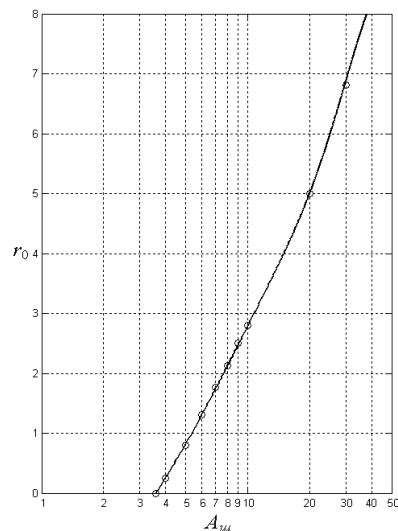


Рис. 6. Залежність $r_0=f(A_{ш})$:
 ◦ – експериментальні точки [3];
 — – крива за формулою (7)

Завдання досліджень. З табл. 2 і рис. 2 і 3 зрозуміло, що обчислені значення допустимої відносної шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу перед діафрагмою $(A_u)_{дон}$ за формулою (4) узгоджуються з експериментальними даними з максимальною відносною похибкою 97,71 %. Таке значення похибки є недопустимим під час вимірювання витрати методом змінного перепаду тиску. А значення $(A_u)_{дон}$, обчислені за формулою (6), мають похибку 4,40 %, що є точним наближенням експериментальних даних. Але формула (6) є громіздкою, тому постає завдання отримати формулу для залежності $(A_u)_{дон}$ від β , яка була б точнішою від формули (4) і компактнішою від формули (6).

З табл. 4 і рис. 5 і 6 зрозуміло, що обчислені значення допоміжного коефіцієнта r_0 за формулою (5) узгоджуються з експериментальними даними з максимальною відносною похибкою 14,23 %. Така точність наближення експериментальних даних є недопустимою під час розрахунку r_0 . Значення r_0 , обчислені за формулою (7), мають похибку 4,31 %, що є точнішим наближенням експериментальних даних. Але формула (7) є громіздкою, тому постає задача отримати формулу для залежності r_0 від A_u , яка була б точнішою від формули (5) і компактнішою від формули (7).

Виклад основного матеріалу. Авторами розроблені нові формули для розрахунку допустимої відносної шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу перед діафрагмою $(A_u)_{дон}$ та допоміжного коефіцієнта r_0 шляхом апроксимації експериментальних даних, наведених в табл. 1 і 3. Здійснивши апроксимацію, були отримані такі аналітичні залежності:

$$(A_u)_{дон} = \frac{1}{57,1079 \cdot \beta^6 + 0,005992} + 3,9415 ; \quad (8)$$

$$r_0 = 4,8854918 \cdot (A_u - 0,6308812)^{0,3} - 6,78826. \quad (9)$$

Порівняння значень $(A_u)_{дон}$, обчислених за формулою (8), з експериментальними даними наведене в табл. 5, а також показане у вигляді графіка на рис. 7.

Таблиця 5

Значення та відносні похибки залежності $(A_u)_{дон}$ від β^2

β	β^2	Експериментальні	Формула (8)	
		дані [4]	$(A_u)_{дон}$	$\delta_{(A_u)_{дон}}, \%$
0,2720	0,074	38,0	38,2663	0,70
0,3162	0,100	20,0	19,7894	-1,05
0,3873	0,150	8,7	8,9734	3,14
0,4472	0,200	6,3	6,1020	-3,14
0,5477	0,300	4,7	4,5875	-2,39
0,6325	0,400	4,2	4,2147	0,35
0,7071	0,500	4,0	4,0815	2,04
0,7746	0,600	3,9	4,0225	3,14
0,8000	0,640	3,9	4,0083	2,78

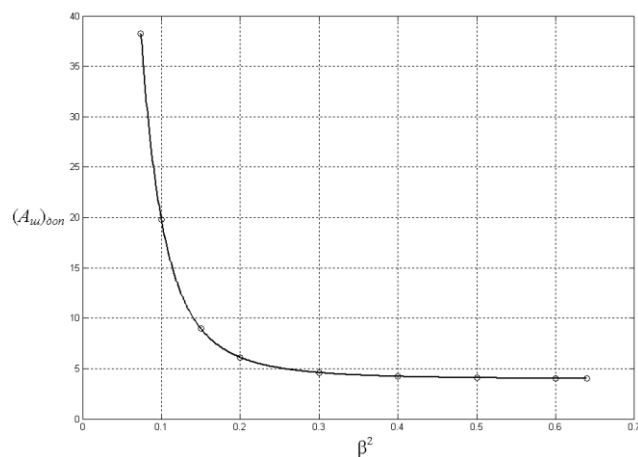


Рис. 7. Залежність $(A_{ш})_{доп}=f(\beta^2)$:
 ◦ – експериментальні точки [4];
 — – крива за формулою (8)

Порівняння обчислених значень r_0 за формулою (9) з експериментальними даними наведено в табл. 6, а також показане у вигляді графіка на рис. 8.

Таблиця 6

Значення та відносні похибки залежності r_0 від $A_{ш}$

$A_{ш}$	Експериментальні дані [3]		Формула (9)	
	r_0		r_0	$\delta_{r_0}, \%$
3,5938	0,00		-0,0208	-
4	0,25		0,2451	-1,96
5	0,80		0,8155	1,93
6	1,31		1,3004	-0,73
7	1,76		1,7257	-1,95
8	2,13		2,1065	-1,10
9	2,50		2,4526	-1,90
10	2,80		2,7709	-1,04
20	5,00		5,0979	1,96
30	6,81		6,6789	-1,93

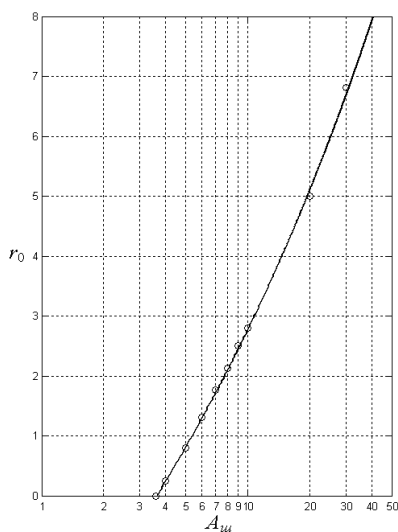


Рис. 8. Залежність $r_0=f(A_{ш})$:
 ◦ – експериментальні точки [3]; — – крива за формулою (9)

У табл. 7 наведені результати розрахунку поправкового коефіцієнта на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу $K_{ш}$ за формулою (1) для відносного діаметра $\beta=0,75$ та числа Рейнольдса $Re=2 \cdot 10^6$ з допоміжним коефіцієнтом r_0 , обчисленим за формулами (5), (7) та (9).

Таблиця 7

Значення та відносні похибки розрахунку $K_{ш}$ за формулою (1)

$A_{ш}$	r_0 за експериментальними даними [3]	r_0 за формулою (5)		r_0 за формулою (7)		r_0 за формулою (9)	
	$K_{ш}$	$K_{ш}$	$\delta_{Кш},\%$	$K_{ш}$	$\delta_{Кш},\%$	$K_{ш}$	$\delta_{Кш},\%$
4	1,0005	1,0007	0,019	1,0005	-0,002	1,0005	0,001
5	1,0016	1,0020	0,040	1,0016	-0,001	1,0016	-0,002
6	1,0027	1,0032	0,048	1,0027	-0,002	1,0026	-0,006
7	1,0035	1,0041	0,061	1,0036	0,007	1,0036	0,004
8	1,0044	1,0049	0,052	1,0044	-0,002	1,0044	-0,004
9	1,0051	1,0057	0,055	1,0052	0,003	1,0052	0,004
10	1,0058	1,0063	0,050	1,0058	0,001	1,0059	0,007
20	1,0111	1,0106	-0,046	1,0108	-0,032	1,0113	0,023
30	1,0148	1,0131	-0,166	1,0147	-0,010	1,0150	0,019

Висновки. З отриманих результатів зрозуміло, що максимальна відносна похибка розрахунку допустимої відносної шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу перед діафрагмою ($A_{ш})_{доп}$ за отриманою формулою (8) становить 3,14 % і вона є меншою за максимальну відносну похибку розрахунку ($A_{ш})_{доп}$ за формулою (4), для якої ця похибка становить 97,71 % по відношенню до наведених експериментальних даних. Розроблена формула (8) є компактнішою від формули (6). Максимальна відносна похибка розрахунку допоміжного коефіцієнта r_0 за отриманою формулою (9) становить 1,96 % і вона є меншою від максимальної відносної похибки розрахунку r_0 за формулою (5), для якої ця похибка становить 14,23 % по відношенню до наведених експериментальних даних. Розроблена формула (9) є компактнішою від формули (7).

Отримані аналітичні залежності підвищують точність визначення поправкового коефіцієнта на шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу, а відтак підвищують і точність визначення витрати та кількості газу за методом змінного перепаду тиску.

1. ГОСТ 8.563.1-97. ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Диафрагмы, сопла ИСА1932 и трубы Вентури, установленные в заполненных трубопроводах круглого сечения. Технические характеристики. 2. ISO 5167-1: 2003 (E). Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular-cross section conduits running full – Part 1: General principles and requirements. Date: 2003-03-01. 3. VDI 2040, Blatt 1.1971. Berechnungsgrundlagen für die Durchflüßzahlen mit Drosselgeräten. Durchflüßzahlen und Expansionszahlen genormter Drosselgeräte und Abweichungen von dem Normvorschriften. – 1972. – P. 30. 4. DIN 1952. Durchflüßmessung mit genormten Dusen, Blenden und Venturidusen (VDI-Durchflüßmeßregeln). – 1971. – P.13. 5. Пістун Є.П., Лесовий Л.В., Химко О.М. Визначення поправкового множника на шорсткість трубопроводу під час вимірювання витрати газу / Нафтова і газова промисловість. – 2000. – №5. – С. – 41–44.