

УДК 006.057:681.121.84

## РОЗРАХУНОК НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ПОПРАВКОВОГО КОЕФІЦІЄНТА ДІАФРАГМИ НА ШОРСТКІСТЬ ВНУТРІШНЬОЇ ПОВЕРХНІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДУ

*Л. В. Лесовой*

*Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, тел. (8-032) 272-77-61, e-mail: [acit@polynet.lviv.ua](mailto:acit@polynet.lviv.ua)*

*Отримано уточнене рівняння розрахунку невизначеності поправкового коефіцієнта, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу, витратоміра змінного перепаду тиску, що працює з діафрагмою.*

*Ключові слова: витрата, поправковий коефіцієнт, діафрагма, вимірювальний трубопровід, невизначеність.*

*Получено уточненное уравнение расчета неопределенности поправочного коэффициента, который учитывает шероховатость внутренней поверхности измерительного трубопровода, расходомера переменного перепада давления, работающего с диафрагмой.*

*Ключевые слова: расход, поправочный коэффициент, диафрагма, измерительный трубопровод, неопределенность.*

*New equation for calculation of value of the uncertainty of the corrective coefficient, which takes into account the roughness to internal surface of the measuring pipe, the pressure difference flowmeter, working with orifice-plate, is received in this paper.*

*Keywords: fuel, corrective coefficient, orifice-plate, measuring pipe, value of the uncertainty.*

При вимірюванні витрати, кількості та енерговмісту паливно-енергетичних ресурсів найбільш широке розповсюдження набув метод змінного перепаду тиску, який застосовує первинний перетворювач діафрагму. Відповідно до Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [1] для здійснення вимірювання витрати та кількості енергоносіїв за методом змінного перепаду тиску необхідно мати відповідні алгоритми розрахунку значень невизначеності результатів вимірювань. Алгоритми розрахунку значень витрати та кількості енергоносіїв, а також невизначеності результату їх вимірювань наведені у Національних стандартах України ДСТУ ГОСТ 8.586.2,5:2009 [2, 3]. Одним із основних коефіцієнтів рівняння витрати газового середовища є поправковий коефіцієнт, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу. Алгоритм розрахунку поправкового коефіцієнта, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу для діафрагми і спрощена форма рівняння для розрахунку його невизначеності також наведені у [2]. Виходячи з вищесказаного, виникає необхідність, застосовуючи вимоги стандартів [2, 3], уточнити рівняння для розрахунку значень невизначеності

поправкового коефіцієнта, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу для діафрагми, що працює в схемі витратоміра змінного перепаду тиску.

До прийняття стандартів [2, 3] в Україні розрахунок значення відносної розширеної невизначеності  $U'_{K_m}$  (відносної похибки  $\delta_{K_m}$ ) поправкового коефіцієнта  $K_m$ , який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу для діафрагми нормувався РД50-213-80 [4] та ГОСТ 8.563.1-97 [5].

Відповідно до нормативного документа РД50-213-80 [4] для діафрагми будь-якого типу значення відносної розширеної невизначеності  $U'_{K_m}$  поправкового коефіцієнта  $K_m$ , який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу, обчислювали за таким рівнянням:

$$U'_{K_m} = 2\sigma_{K_m} = \begin{cases} 0 & \text{для } D \geq 0,3 \text{ або } \sigma_{K_m} \leq 0 \\ 2 \left[ 1,67\beta^2 + (0,081 - D) \times \right. \\ \left. \times (66,3D^2 - 33,7D + 6,9) \right] & \\ 0 & \text{для } D < 0,3 \text{ і } \sigma_{K_m} > 0 \end{cases}, \quad (1)$$

де  $\sigma_{K_m}$  – відносна середньоквадратична похибка визначення поправкового коефіцієнта  $K_m$ ,  $\beta$  – відносний діаметр діафрагми,  $D$  – внутрішній діаметр трубопроводу при температурі середовища.

Відносний діаметр  $\beta$  діафрагми визначається за рівнянням

$$\beta = \frac{d}{D}, \quad (2)$$

де  $d$  – діаметр отвору діафрагми при температурі середовища.

Якщо значення поправкового коефіцієнта  $K_m$  розраховується відповідно згідно ГОСТ 8.563.1-97 [5], то відносну розширену невизначеність  $U'_{K_m}$  (відносну похибку  $\delta_{K_m}$ ) визначають за рівнянням:

– у випадку, якщо відносна похибка визначення коефіцієнта тертя  $\lambda$  середовища об стінку вимірювального трубопроводу становить не більше, ніж  $\pm 10\%$ , то відносну похибку  $\delta_{K_m}$  визначають за таким рівнянням:

$$U'_{K_m} = \delta_{K_m} = 50(K_m - 1); \quad (3)$$

– у випадку, якщо ж експериментально визначити коефіцієнт тертя  $\lambda$  середовища об стінку вимірювального трубопроводу неможливо, а еквівалентну шорсткість  $R_m$  внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу визначають за відомою таблицею [5], то відносну похибку  $\delta_{K_m}$  визначають за таким рівнянням:

$$U'_{K_m} = \delta_{K_m} = 100(K_m - 1). \quad (4)$$

Відповідно до Національного стандарту України ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 [2] значення відносної розширеної невизначеності  $U'_{K_m}$  поправкового коефіцієнта  $K_m$  розраховують за таким рівнянням:

$$U'_{K_m} = \frac{K_m - 1}{K_m} U'_{R_m}. \quad (5)$$

де  $U'_{R_m}$  – відносна розширена невизначеність результату вимірювання еквівалентної шорсткості  $R_m$  внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу.

Значення відносної розширеної

невизначеності  $U'_{R_m}$  наведені у [6], якщо еквівалентна шорсткість  $R_m$  вибирається із таблиці, яка приведена у [6], або дорівнює значенню відносної похибки засобу вимірювання еквівалентної шорсткості  $R_m$  при її вимірюванні.

Проведеними дослідженнями було встановлено, що рівняння (1), (3)–(5) для розрахунку значень відносної розширеної невизначеності  $U'_{K_m}$  поправкового коефіцієнта  $K_m$ , який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу, мають недоліки, а саме:

– рівняння наведені у РД50-213-80 [4] та ГОСТ 8.563.1-97 [5] застосовували для визначення  $U'_{K_m}$  поправкового коефіцієнта  $K_m$ , для якого рівняння було отримане за старими експериментальними даними [7] цього коефіцієнта. Для нових експериментальних даних, отриманих Reader-Harris, застосування рівнянь наведених у РД50-213-80 [4] та ГОСТ 8.563.1-97 [5] для визначення  $U'_{K_m}$  втрачає зміст;

– рівняння, яке було введено у Національному стандарті України ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 [2], представляє собою спрощену форму рівняння відносної розширеної невизначеності  $U'_{K_m}$ , яка не враховує відносні коефіцієнти чутливості поправкового коефіцієнта  $K_m$  до величини або параметру, що входять у рівняння його визначення.

Виходячи з вищевказаного, необхідно отримати уточнене рівняння для розрахунку значення відносної розширеної невизначеності  $U'_{K_m}$  поправкового коефіцієнта  $K_m$ , яке враховує відносні коефіцієнти чутливості.

Поправковий коефіцієнт  $K_m$ , який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу, визначають за таким рівнянням [2]:

$$K_m = \begin{cases} 1 & \text{для } R_m \leq R_{m\max} \text{ і } R_m \geq R_{m\min} \\ 1 + 5,22 \cdot \beta^{3,5} (\lambda - \lambda^*) & \\ 1 & \text{для } R_m > R_{m\max} \text{ або } R_m < R_{m\min} \end{cases}, \quad (6)$$

де  $\lambda$  і  $\lambda^*$  – коефіцієнти тертя, значення яких розраховані при дійсному значенні числа Рейнольдса  $Re$  і значенні еквівалентної шорсткості вимірювального трубопроводу, яке

дорівнює її дійсному значенню  $R_{ш}$ , наведеному у [6], і при допустимому значенні  $R_{ш}^*$ , значення якого обчислюється згідно [2].

Значення коефіцієнта тертя  $\lambda$  середовища об стінку вимірювального трубопроводу розраховують за рівнянням [2]:

$$\lambda = \begin{cases} 1,74 - 21 \lg \left[ \frac{2R_{ш}}{D} - \frac{37,36}{Re} \times \right. \\ \left. \times \lg(k_D - k_R \lg(k_D + 3,3333k_R)) \right]^{-2} \end{cases}, \quad (7)$$

$$k_D = 0,26954 \frac{R_{ш}}{D}, \quad (8)$$

$$k_R = \frac{5,035}{Re}. \quad (9)$$

Значення ж коефіцієнта тертя  $\lambda^*$  середовища об стінку вимірювального трубопроводу розраховують за рівняннями (7)–(9), але за допустимим значенням еквівалентної шорсткості  $R_{ш}$  вимірювального трубопроводу.

Так як поправковий коефіцієнт  $K_{ш}$  у рівнянні (6) з урахуванням рівнянь (2), (7) – (9) залежить від діаметру отвору  $d$  діафрагми, внутрішнього діаметру  $D$  вимірювального трубопроводу, еквівалентної шорсткості  $R_{ш}$  та допустимої еквівалентної шорсткості  $R_{ш}^*$  внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу, числа Рейнольдса  $Re$ , то відносну розширену невизначеність  $U'_{K_{ш}}$  визначають за таким рівнянням:

$$U'_{K_{ш}} = \begin{cases} 0 & \text{для } R_{ш} \leq R_{ш\max} \text{ і } R_{ш} \geq R_{ш\min} \\ \left( U'^2_{K_{ш}} + \vartheta_d^2 U'^2_d + \vartheta_D^2 U'^2_D + \right. \\ \left. + \vartheta_{R_{ш}}^2 U'^2_{R_{ш}} + \vartheta_{R_{ш}^*}^2 U'^2_{R_{ш}^*} + \vartheta_{Re}^2 U'^2_{Re} \right)^{0,5} & \\ \text{для } R_{ш} > R_{ш\max} \text{ або } R_{ш} < R_{ш\min} \end{cases}, \quad (10)$$

де  $U'_{K_{ш}}$  – відносна розширена невизначеність методу розрахунку значень поправкового коефіцієнта  $K_{ш}$ , значення якої дорівнює максимальному значенню відносного відхилення  $\delta_{K_{ш}}$ ;  $\vartheta_d, \vartheta_D, \vartheta_{R_{ш}}, \vartheta_{R_{ш}^*}, \vartheta_{Re}$  – відносні коефіцієнти чутливості поправкового коефіцієнта  $K_{ш}$  до відповідно діаметра отвору  $d$  діафрагми, внутрішнього діаметра  $D$  вимірювального трубопроводу, еквівалентної

шорсткості  $R_{ш}$  внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу, допустимої еквівалентної шорсткості  $R_{ш}^*$  внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу, числа Рейнольдса  $Re$ , відповідно;  $U'_d, U'_D, U'_{R_{ш}}, U'_{R_{ш}^*}, U'_{Re}$  – відносні розширені невизначеності відповідно результату вимірювання діаметра отвору  $d$  діафрагми, внутрішнього діаметра  $D$  вимірювального трубопроводу, еквівалентної шорсткості  $R_{ш}$  внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу, допустимої еквівалентної шорсткості  $R_{ш}^*$  внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу, числа Рейнольдса  $Re$ , відповідно.

Відносний коефіцієнт  $\vartheta_{x_i}$  чутливості поправкового коефіцієнта  $K_{ш}$  до  $x_i$  величини або параметру визначають за рівнянням [3]

$$\vartheta_{x_i} = \frac{\partial K_{ш}}{\partial x_i} \frac{x_i}{K_{ш}}, \quad (11)$$

де  $\frac{\partial K_{ш}}{\partial x_i}$  – часткова похідна поправкового

коефіцієнта  $K_{ш}$  по величині  $x_i$ , який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу.

Так як значення відносної розширеної невизначеності результатів вимірювання величин, що входять у рівняння для визначення поправкового коефіцієнта, який враховує шорсткість внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу, відрізняються більше, ніж у 100 разів, наприклад,  $U'_{R_{ш}} = 20\%$  і  $U'_D = 0,2\%$ , то нами було встановлено, що сумарна відносна розширена невизначеність  $U'_{K_{ш}}$  в основному залежить від  $U'_{R_{ш}}$ , а відносними розширеними невизначеностями  $U'_{K_{ш}} = 0,003\%$ ,  $U'_d = 0,04\%$ ,  $U'_D = 0,2\%$ ,  $U'_{R_{ш}^*} = 0,2\%$ ,  $U'_{Re} = 0,001\%$  з їх відносними коефіцієнтами чутливості  $\vartheta_d, \vartheta_D, \vartheta_{R_{ш}^*}, \vartheta_{Re}$  можна знехтувати.

Виходячи з цього, нами було отримане таке уточнене рівняння для розрахунку значення відносної розширеної невизначеності  $U'_{K_{ш}}$  поправкового коефіцієнта  $K_{ш}$ :

$$U'_{K_{ш}} = \begin{cases} 0 & \text{для } R_{ш} \leq R_{ш\max} \text{ і } R_{ш} \geq R_{ш\min}, \\ 4 \left(1 - \frac{1}{K_{ш}}\right) \frac{U'_{R_{ш}} \lambda \sqrt{\lambda}}{(\lambda - \lambda^*) \ln(10)} \times \\ \times \left[ 1 - \frac{k_R}{k_D \ln(10)} \frac{1 - \frac{k_R}{k_D \ln(10) \left(1 + \frac{10 k_R}{3 k_D}\right)}}{1 - \frac{k_R}{k_D} \lg\left(k_D + \frac{10 k_R}{3}\right)} \right] \times (12) \\ \left\{ 1 - \frac{k_R}{k_D} \lg \left[ k_D - k_R \lg \left( k_D + \frac{10 k_R}{3} \right) \right] \right\}^{-1} \\ \text{для } R_{ш} > R_{ш\max} \text{ або } R_{ш} < R_{ш\min}. \end{cases}$$

На рис. 1 у графічній формі представлено порівняльний аналіз значень відносної розширеної невизначеності  $U'_{K_{ш}}$  поправкового коефіцієнта  $K_{ш}$ , які обчислені за рівнянням (12) та за рівнянням (5), яке наведене в ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 [2], для таких вхідних даних:

– внутрішній діаметр  $D$  вимірювального

трубопроводу при робочій температурі приймався рівним 0,05 м;

– еквівалентна шорсткість  $R_{ш}$  внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу приймалася такою, рівною 0,0012 м;

– відносний діаметр  $\beta$  діафрагми приймався в діапазоні від 0,1 до 0,7;

– число Рейнольдса  $Re$  приймалося рівним значенням  $10^4$  і  $10^6$ ;

– відносна розширена невизначеність  $U'_{R_{ш}}$  результату вимірювання еквівалентної шорсткості  $R_{ш}$  приймалося рівною 20 %.

Як бачимо з рис. 1 значення відносної розширеної невизначеності  $U'_{K_{ш}}$ , які були розраховані за рівнянням (12), є меншими за значення відносної розширеної невизначеності, які були розраховані за рівнянням (5), наведеним у ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 [2]:

– для значення числа Рейнольдса  $Re=10^4$  значення відносної розширеної невизначеності  $U'_{K_{ш}}$ , яке було розраховане за рівнянням (12), становить 0,55 %, а значення відносної розширеної невизначеності  $U'_{K_{ш}}$ , яке було розраховане за рівнянням (5), становить 0,66 %;

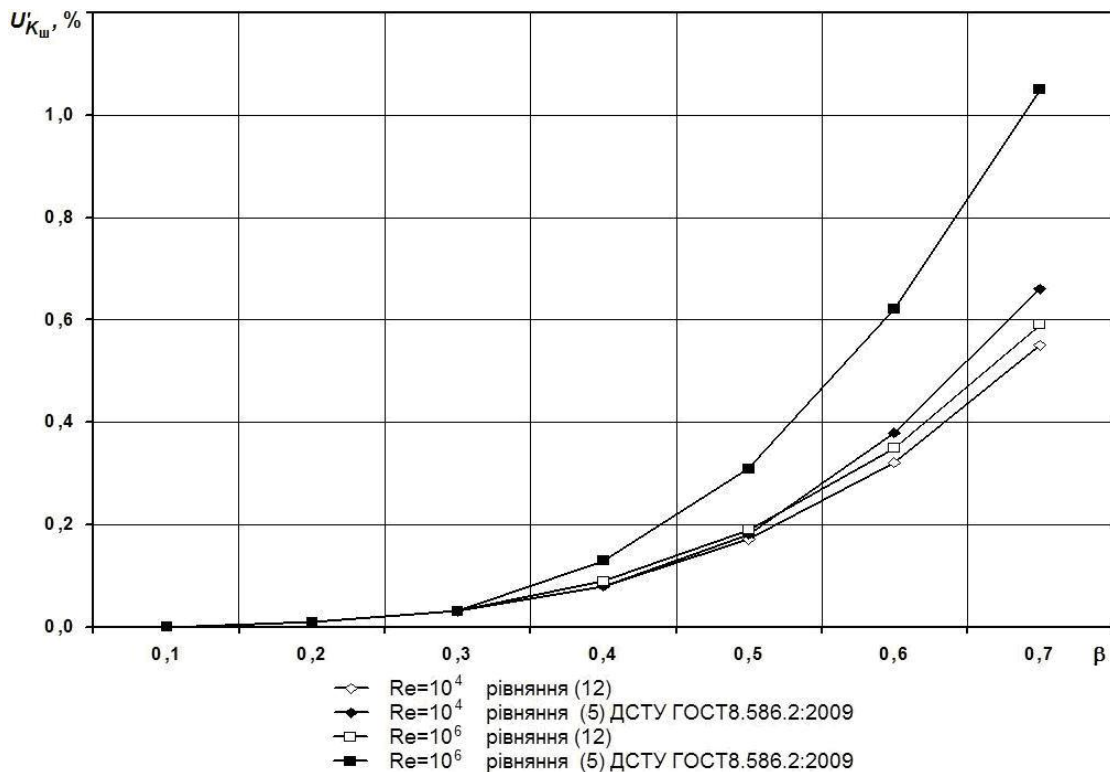


Рисунок 1 – Невизначеності  $U'_{K_{ш}}$  поправкового коефіцієнта  $K_{ш}$ , визначені за рівнянням (8) та відповідно до ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 [2]

– для числа Рейнольдса  $Re=10^6$  значення відносної розширеної невизначеності  $U'_{K_{ш}}$ , яке було розраховане за рівнянням (12), становить 0,59 %, а значення відносної розширеної невизначеності  $U'_{K_{ш}}$ , яке було розраховане за рівнянням (5), становить 1,05 %.

### ВИСНОВОК

Уточнене рівняння (12) визначення відносної розширеної невизначеності  $U'_{K_{ш}}$  поправкового коефіцієнта  $K_{ш}$  враховує вплив коефіцієнтів чутливості на невизначеність  $U'_{K_{ш}}$ , що зменшує її значення і зменшує сумарну відносну розширену невизначеність результату вимірювання витрати та кількості газового середовища, складником якої і є ця невизначеність. Крім того, рівняння (12) рекомендується для введення у нормативні документи з вимірювання витрати та кількості газового середовища.

1. Про метрологію та метрологічну діяльність. Закон України. – [Чинний від 2004–06–15]. № 1765–IV. 2. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідин і газів за допомогою стандартних звужуючих пристроїв. Частина 2. Діафрагми. Технічні вимоги. (ГОСТ 8.586.2–2005 (ІСО 5167–2:2003), IDT; ISO 5167–2:2003, NEQ) [Текст] : ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009. – [Чинний від 2010–04–01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2010. – 89 с. 3. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідин і газів за допомогою стандартних звужуючих пристроїв. Частина 5.

Методика виконання вимірювань. (ГОСТ 8.586.5–2005, IDT) [Текст] : ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009. – [Чинний від 2010–04–01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2010. – 196 с. 4. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. РД 50–213–80. – М.: Изд–во стандартов, 1982. – 320 с. 5. ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Диафрагмы, сопла ИСА 1932 и трубы Вентури, установленные в заполненных трубопроводах круглого сечения. Технические условия. ГОСТ 8.563.1–97. – [Чинний від 2001–04–24]. – Киев: Госстандарт Украины, 2001. – 61 с. 6. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини і газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 1. Принцип методу вимірювань та загальні вимоги. (ГОСТ 8.586.1–2005 (ІСО 5167–1:2003), IDT; ISO 5167–1:2003, NEQ) [Текст] : ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009. – [Чинний від 2010–04–01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2010. – 98 с. 7. Berechnungsgrundlagen für die Durchflußzahlen mit Drosselgeräten. Durchflußzahlen und Expansionszahlen genormter Drosselgerate und Abweichungen von dem Normvorschriften. VDI 2040, Blat 1.1971, 1972. – 30 p.

Поступила в редакцію 03.11.2010 р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук,  
проф. Пісгун Є.П.