

- вдосконалити й чітко регламентувати законодавчі акти з процедури перевірки автомобіля на відповідність екологічним нормам;
- розширити мережу електротранспорту (трамвай, тролейбус) як екологічно безпечного транспорту;
- проектувати об'їзні шляхи для транзитного транспорту.

1. Статистичні дані 2006–2007 рр. // Управління екології та природних ресурсів у Львівській області. 26 с. 2. Статистичні дані 2008 р. // ДП “Львів-стандартметрологія”. – 10 с. 3. Запольський А.К., Салюк А.І. Основи екології: Підручник / За ред. К.М.Ситника. – К.: Вища шк., 2005. – 382 с.

УДК 681.121.84

ВПЛИВ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГАЗОПОДІБНИХ ЕНЕРГОНОСІЇВ НА ТОЧНІСТЬ ЇХ ОБЛІКУ

О Федір Матіко, 2009

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра автоматизації теплових та хімічних процесів,
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

Виконано аналіз впливу невизначеностей фізичних властивостей газоподібних енергоносіїв на невизначеність результату вимірювання витрати за методом змінного перепаду тиску. Сформовано вимоги до точності методів визначення фізичних властивостей газоподібних середовищ.

Выполнен анализ влияния неопределенностей физических свойств газообразных энергоносителей на неопределенность результата измерения расхода по методу переменного перепада давления. Сформированы требования к точности методов определения физических свойств газообразных сред.

The analysis of the influence of uncertainties of gas physical properties on the uncertainty of the result of flow rate measurement by the method of differential pressure is made. The requirements to the precision of the methods of determination of gas physical properties are proposed.

Постановка задачі. Сучасні системи обліку енергоносіїв побудовані на основі мікропроцесорних обчислювачів витрати і кількості. Це дає можливість реалізувати в реальному часі обчислення витрати і кількості із урахуванням параметрів фізичних властивостей. Причому параметри фізичних властивостей (наприклад, густина) можуть вимірюватись або обчислюватись в реальному часі на основі вимірних значень тиску, температури та параметрів складу середовища.

У найпоширеніших конфігураціях систем обліку параметри фізичних властивостей енергоносіїв обчислюються в реальному часі на основі вимірних значень тиску і температури та на основі визначених попередньо та введених в обчислювач значень параметрів складу. Відповідно розрахунок витрати і кількості виконується на основі обчислених значень фізичних властивостей та вимірних значень параметрів потоку. За умови застосування такого способу побудови

систем обліку істотним може бути вплив невизначеностей результату обчислення фізичних властивостей на невизначеність вимірюваного значення витрати.

Формулювання цілі статті. Метою цієї роботи є аналіз впливу невизначеностей результату обчислення фізичних властивостей на невизначеність вимірюваного значення витрати за допомогою методу змінного перепаду тиску та розроблення вимог до точності методів визначення фізичних властивостей газоподібних середовищ для їх застосування у задачах обліку.

Аналіз останніх досліджень. Питання впливу невизначеностей результату обчислення фізичних властивостей на невизначеність вимірюваного значення витрати за допомогою методу змінного перепаду тиску опрацьовані, зокрема, у нормативних документах [1–3]. У цих роботах наведено аналітичні

залежності для розрахунку невизначеності вимірюваного значення витрати із урахуванням невизначеностей результатів обчислення фізичних властивостей. Однак ні в [1–3], ні в інших відомих автору джерелах немає кількісних оцінок названого впливу, за якими можна було б сформулювати вимоги до точності методів визначення фізичних властивостей газоподібних середовищ.

Виклад основного матеріалу. У табл. 1 наведено перелік параметрів фізичних властивостей, які згідно з чинними нормативними документами [1], [2] необхідно визначати в задачах обліку газоподібних середовищ. Як видно із табл. 1, всі перераховані параметри застосовані у рівнянні обчислення витрати за методом змінного перепаду тиску. Тому насамперед необхідно оцінити вплив невизначеностей названих параметрів на невизначеність результату вимірювання витрати газоподібних середовищ за методом змінного перепаду тиску. Залежність витрати, вимірюваної за методом змінного перепаду тиску, від вхідних параметрів є відомою [1], [2]. У цьому випадку коефіцієнти впливу невизначеностей вхідних параметрів на сумарну невизначеність вимірювання витрати можуть бути знайдені відповідно до ISO 5168 [3]:

$$c^*_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{y}, \quad (1)$$

де c^*_i – безрозмірний коефіцієнт впливу параметра x_i на вихідну величину y .

Тоді за умови, що відомі коефіцієнти впливу всіх вхідних параметрів і вхідні параметри некорельовані,

відносна сумарна невизначеність вихідної величини $u'_c(y)$ може бути обчислена за формулою [3]:

$$u'_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c^*_i u'(x_i)]^2}, \quad (2)$$

де $u'(x_i)$ – відносна невизначеність вхідного параметра x_i .

Застосування формул (1), (2) до рівняння витрати за методом змінного перепаду тиску (див. рівняння (5.8) [2]) дає таку залежність для обчислення відносної стандартної невизначеності результату вимірювання об'ємної витрати газу, зведеної до стандартних умов (далі невизначеності витрати) [2]:

$$u'_q = \left\{ u'^2_{Kq} + u'^2_C + u'^2_{Kш} + u'^2_{Kп} + \left(\frac{2b^4}{1-b^4} \right)^2 u'^2_D + \left(\frac{2}{1-b^4} \right)^2 u'^2_d + u'^2_e + 0,25 \left(u'^2_{\Delta p} + u'^2_p + u'^2_T + u'^2_K + u'^2_{r_c} \right) \right\}^{0,5}. \quad (3)$$

Усі позначення у формулі (3) відповідають стандарту ДСТУ ГОСТ 8.585.5-2007 [2], зокрема: u'_K – відносна стандартна невизначеність (далі невизначеність) коефіцієнта стисливості; u'_e – невизначеність коефіцієнта розширення газового потоку, яка є функцією, зокрема, і невизначеності показника адіабати u'_κ ; u'_{r_c} – невизначеність густини за стандартних умов.

Таблиця 1

Параметри фізичних властивостей для задач обліку газоподібних середовищ

Назва параметра	Застосування
Коефіцієнт стисливості	Рівняння витрати за методом змінного перепаду тиску, рівняння приведення вимірюваного об'єму газу до стандартних умов
Показник адіабати	Коефіцієнт розширення в рівнянні витрати за методом змінного перепаду тиску, зниження температури в отворі пристрою звуження (ДСТУ ГОСТ 8.586.1-2007 [1])
Коефіцієнт динамічної в'язкості	Визначення числа Рейнольдса для розрахунку коефіцієнтів (витікання, шорсткості) у рівнянні витрати; розрахунок граничних значень числа Рейнольдса для контролю за областю застосування методу змінного перепаду тиску і деяких інших методів.
Коефіцієнт Джоуля–Томсона (коефіцієнт дроселювання)	Визначення температури до пристрою звуження за вимірюваною температурою після нього при значних перепадах тиску (ДСТУ ГОСТ 8.586.5-2007 [2]).

Вплив складових u'_K , u'_{ρ_c} на невизначеність витрати u'_q визначається безпосередньо рівнянням (3). Спрощено вплив цих складових на u'_q можна виділити, допускаючи, що всі складові невизначеності в рівнянні (3), крім u'_K , u'_{ρ_c} , близькі до нуля. Тоді отримуємо:

$$u'_q = 0,5u'_K, \text{ при } u'_X = 0, X \neq K; \quad (4)$$

$$u'_q = 0,5u'_{\rho_c}, \text{ при } u'_X = 0, X \neq \rho_c. \quad (5)$$

Оскільки коефіцієнт стисливості знаходиться в знаменнику рівняння витрати, то вплив коефіцієнта стисливості на витрату є обернено пропорційним: завищення коефіцієнта стисливості приводить до зниження витрати і навпаки. Тобто відносне відхилення коефіцієнта стисливості δ_K та відносне відхилення витрати δ_q зв'язані такою наближеною залежністю:

$$\delta_q = -0,5\delta_K. \quad (6)$$

Залежність (6) підтверджено прикладом, наведеним у табл. 2. Приклад полягає у визначенні відносного відхилення витрати природного газу у двох розрахунках виконаних для однакових вихідних даних, але у першому застосований метод розрахунку коефіцієнта стисливості природного газу NX19 мод., а в другому – GERG91 мод. [4]. Розрахунок витрати виконано за методикою ДСТУ ГОСТ 8.586.5-2007. Відносні відхи-

лення коефіцієнта стисливості та витрати визначено за формулами:

$$\delta_K = (K_{GERG} - K_{NX}) / K_{NX} \cdot 100\%,$$

$$\delta_Q = (Q_{GERG} - Q_{NX}) / Q_{NX} \cdot 100\%, \quad (7)$$

де K – коефіцієнт стисливості, Q – витрата природного газу.

Отже, цей приклад дає змогу оцінити відхилення між значеннями двох методів розрахунку коефіцієнта стисливості природного газу – NX19 мод. та GERG91 мод., стандарту [4], а також відносне відхилення значень витрати внаслідок відхилення коефіцієнта стисливості. Як видно із табл. 2, наближена залежність (4) виконується із незначними відхиленнями за різних значень тиску та температури газу.

Крім того, із табл. 2 видно, що застосування того чи іншого методу розрахунку коефіцієнта стисливості природного газу (навіть із переліку стандартизованих методів) може привести до зміни розрахункового значення коефіцієнта стисливості і, відповідно, розрахункового значення витрати. Нами виконано порівняльний аналіз методів розрахунку коефіцієнта стисливості природного газу, результати якого наведено, зокрема, в [5]. За результатами цього порівняльного аналізу може бути правильно виконаний вибір методу розрахунку коефіцієнта стисливості для заданих умов вимірювання витрати.

Таблиця 2

Відносні відхилення значень коефіцієнта стисливості та витрати природного газу такого складу: $\rho_c = 0,72 \text{ кг/м}^3$, $x_a = 1,0 \%$, $x_y = 0,5 \%$.

T, °C	$P_{\text{абс}}$, МПа	K_{NX}	K_{GERG}	δ_K , %	δ_Q , %
-20	1,0	0,9684	0,9676	-0,078	0,039
	3,0	0,8985	0,8962	-0,259	0,130
	5,0	0,8263	0,8223	-0,482	0,242
	7,0	0,7546	0,7492	-0,718	0,361
0	1,0	0,9758	0,9752	-0,057	0,029
	3,0	0,9227	0,9209	-0,201	0,101
	5,0	0,8704	0,8670	-0,398	0,200
	7,0	0,8208	0,8155	-0,646	0,325
10	1,0	0,9788	0,9783	-0,045	0,022
	3,0	0,9323	0,9308	-0,159	0,080
	5,0	0,8873	0,8844	-0,320	0,160
	7,0	0,8452	0,8407	-0,530	0,266
20	1,0	0,9814	0,9811	-0,032	0,016
	3,0	0,9406	0,9395	-0,113	0,057
	5,0	0,9015	0,8994	-0,232	0,116
	7,0	0,8655	0,8621	-0,392	0,197

Вплив невизначеності густини за стандартних умов u'_{ρ_c} на невизначеність витрати u'_q наближено можна визначити за (5). Як видно із (5), вплив u'_{ρ_c} буде аналогічним до впливу невизначеності коефіцієнта стисливості. Обидва параметри (і коефіцієнт стисливості, і густина газу за стандартних умов) знаходяться в знаменнику рівняння витрати (див. рівняння (5.8) [2]), а отже, вплив густини ρ_c на витрату є також обернено пропорційним і виражається рівнянням зв'язку відносних відхилень, аналогічним до (6):

$$\delta_q = -0,5\delta_{\rho_c} . \quad (8)$$

Для прикладу, в результаті порівняння значень витрати, обчислених згідно з методикою ДСТУ ГОСТ 8.586.5-2007 для двох значень густини газу за стандартних умов: $\rho_{c1}=0,70 \text{ кг/м}^3$ та $\rho_{c2}=0,71 \text{ кг/м}^3$ (відносна зміна густини $\delta_{\rho_c} = (\rho_{c2} - \rho_{c1})/\rho_{c1} \cdot 100\% = +1.43 \%$), отримуємо відносну зміну витрати на $-0,67 \dots -0,71\%$ (при зміні тиску від 0.2 до 1.2 МПа та температури від $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+10 \text{ }^\circ\text{C}$).

Тобто при завищенні значення густини ρ_c на $+1.43 \%$ отримуємо **зниження витрати** за методом змінного перепаду тиску на $-0,67 \dots -0,71 \%$ і навпаки.

Зазначимо, що у переважній більшості систем обліку, які експлуатуються в промисловості України, параметри складу газових сумішей, зокрема й густина за стандартних умов, періодично визначаються хіміко-аналітичними лабораторіями підприємств та вводяться як умовно-постійні параметри в обчислювачі витрати. Період введення значень параметрів складу може досягати 10–14 днів. Очевидно, що упродовж такого тривалого періоду значення ρ_c може змінюватись в широких межах, внаслідок чого може виникати додаткова невизначеність результату вимірювання густини ρ_c , яка може бути визначена на основі формули, запропонованої в новому стандарті ДСТУ ГОСТ 8.586.5–2007 [2]:

$$u'_{\rho_c \text{ дод}} = \frac{\rho_{c \text{ max}} - \rho_{c \text{ min}}}{\sqrt{3}(\rho_{c \text{ max}} + \rho_{c \text{ min}})} 100, \quad (9)$$

де $\rho_{c \text{ max}}$, $\rho_{c \text{ min}}$ – значення густини за стандартних умов на початку та в кінці періоду введення.

Для прикладу, на одному із діючих вузлів обліку природного газу, аудит якого виконував автор, значення густини газу ρ_c на початку періоду введення дорівнювало $0,687 \text{ кг/м}^3$, в кінці періоду введення (через 14 днів) – $0,705 \text{ кг/м}^3$. Тобто додаткова відносна стандартна невизначеність результату вимірювання густини ρ_c становить $u'_{\rho_c \text{ дод}}=0,75 \%$. Отже, незва-

жаючи на те, що розширена невизначеність результату вимірювання густини за стандартних умов у лабораторії становить $U'_{\rho_c \text{ вимір}} = 0,25 \%$, сумарна стандартна невизначеність результату визначення ρ_c дорівнює

$$u'_{\rho_c} = \sqrt{(U'_{\rho_c \text{ вимір}}/2)^2 + u'_{\rho_c \text{ дод}}^2} = 0,76 \%. \quad (10)$$

Отже, зменшення невизначеності результату визначення густини за стандартних умов можливе тільки при зменшенні її додаткової складової, зумовленої значним періодом дискретизації цього параметра. Для цього необхідно зменшити період введення значення ρ_c або застосовувати у складі системи обліку засоби автоматичного визначення та введення параметрів складу.

Невизначеність показника адіабати u'_k враховується у рівнянні (3) в складі невизначеності коефіцієнта розширення газового потоку u'_ϵ . Залежність для визначення невизначеності коефіцієнта розширення має вигляд [2]:

$$u'_\epsilon = \left[0,25U_{\epsilon_0}'^2 + \left(\frac{\epsilon - 1}{\epsilon} \right)^2 (u_{\Delta p}'^2 + u_p'^2 + u_k'^2) \right]^{0,5} . \quad (11)$$

Прийнявши, що $u'_{\Delta p}$, u'_p , $U_{\epsilon_0}' = 0$, отримуємо рівняння

$$u'_\epsilon = \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} u'_k . \quad (12)$$

За рівнянням (12) можна визначити вплив невизначеності показника адіабати u'_k на невизначеність коефіцієнта розширення газу u'_ϵ . Коефіцієнт впливу визначається значенням коефіцієнта розширення ϵ , який є функцією відношення перепаду тиску до тиску перед пристроєм звуження $\Delta p/P$, відносного діаметра β та показника адіабати k . Для умов роботи переважної більшості вузлів обліку значення ϵ незначно відрізняється від одиниці, тому коефіцієнт впливу u'_k на u'_ϵ не перевищує 0,1. Наприклад, якщо відношення $\Delta p/P=0,2$, то невизначеність коефіцієнта розширення u'_ϵ згідно із (12) набуває значень, наведених в табл.3.

Як видно із табл. 3, навіть за великих відношень $\Delta p/P$ розрахунок показника адіабати з невизначеністю, не більшою за 3%, призведе до невизначеності розрахунку коефіцієнта розширення ϵ не більше ніж 0,25 %, що співмірно із похибками сучасних вимірювальних перетворювачів для систем обліку газу.

Таблиця 3

Залежність невизначеності u'_ϵ від u'_κ для $\Delta p/P=0,2$

β	κ	$u'_\kappa, \%$					
		1	2	3	4	5	10
0,2	1,3	0,06	0,12	0,18	0,23	0,29	0,59
	1,5	0,05	0,10	0,15	0,20	0,26	0,51
0,4	1,3	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,60
	1,5	0,05	0,10	0,16	0,21	0,26	0,52
0,7	1,3	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,79
	1,5	0,07	0,14	0,21	0,28	0,34	0,69

Таблиця 4

Залежність $\sigma_{k_{Re}}, \%$ від $\sigma_\mu, \%$

m	Re	$\sigma_\mu, \%$				
		2	3	4	5	10
0,2	$3 \cdot 10^4$	0,016	0,025	0,033	0,042	0,083
	10^5	0,006	0,009	0,012	0,015	0,030
	10^7	0,001	0,002	0,002	0,003	0,005
0,4	$3 \cdot 10^4$	0,039	0,059	0,079	0,098	0,197
	10^5	0,014	0,021	0,028	0,035	0,070
	10^7	0,003	0,004	0,005	0,006	0,013
0,6	$3 \cdot 10^4$	0,067	0,100	0,133	0,167	0,333
	10^5	0,024	0,036	0,048	0,060	0,120
	10^7	0,004	0,006	0,009	0,011	0,021

У рівнянні розрахунку невизначеності витрати (3) виключено вплив невизначеності коефіцієнта динамічної в'язкості на невизначеність витрати. Це зв'язано з тим, що у методиці розрахунку витрати за ДСТУ ГОСТ 8.586.5-2007 [2] застосовано ітераційний розрахунок витрати із відповідним ітераційним уточненням числа Рейнольдса. Отже, у рівнянні витрати за [1], [2] відсутній поправний множник на число Рейнольдса k_{Re} , як у попередньому документі РД 50-213-80 [6], який враховує відхилення числа Рейнольдса при робочій витраті від його базового значення і невизначеність обчислення якого залежить від невизначеності визначення в'язкості середовища. Тому показати вплив невизначеності в'язкості на невизначеність витрати можна на прикладі залежностей РД 50-213-80 [6], які ґрунтуються на методиці виконання прямого (безітераційного) розрахунку витрати. При виконанні ітераційного розрахунку без застосування поправного множника k_{Re} цей вплив буде ще меншим.

У наступних викладках застосуємо позначення та терміни, що відповідають документу РД 50-213-80.

Згідно із РД 50-213-80 у рівняння розрахунку похибки вимірювання витрати входить похибка

визначення поправного множника на число Рейнольдса $\sigma_{k_{Re}}$, значення якої знаходять за формулою

$$\sigma_{k_{Re}} = (1 - k_{Re}) \sigma_\mu, \quad (13)$$

де σ_μ – середня квадратична похибка визначення динамічної в'язкості; k_{Re} – поправний множник на число Рейнольда.

За РД 50-213-80 коефіцієнт k_{Re} є функцією числа Рейнольдса Re та відносної площі пристрою звуження m . Відносна площа пристроїв звуження може набувати значень $0,05 \leq m \leq 0,64$, а діапазон зміни числа Рейнольдса – $Re_{min} \leq Re \leq 10^8$. Мінімумально допустиме число Рейнольдса для діафрагм з кутовим способом відбору перепаду тиску набуває значення від $5 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^4$. Залежність середньої квадратичної похибки поправного множника на число Рейнольдса $\sigma_{k_{Re}}$ від похибки визначення в'язкості σ_μ для робочого діапазону чисел Рейнольдса та відносної площі m наведено в табл. 4.

Із табл. 4 видно, що чутливість $\sigma_{k_{Re}}$ до σ_μ зростає тільки за великих значень відносної площі m та числах Рейнольдса, близьких до Re_{min} . Для цієї області

середньоквадратична похибка розрахунку в'язкості не повинна перевищувати 5 ... 6 %. За своїм змістом середня квадратична похибка у класичній метрології може бути зіставлена із стандартною невизначеністю результату вимірювання у теорії невизначеності. Тому в термінах невизначеності попередній висновок можна перефразувати так: стандартна невизначеність результату визначення в'язкості не повинна перевищувати 5 ... 6 %, для того, щоб стандартна невизначеність коефіцієнта K_{Re} не перевищувала 0,2 %.

Висновки. Отже, необхідною умовою підвищення точності витратомірів змінного перепаду тиску є наявність точних методів та засобів визначення фізичних властивостей середовищ. Для деяких середовищ, зокрема природного газу, нормативне забезпечення із визначення фізичних властивостей розроблене та постійно вдосконалюється. Однак і тут залишаються не вирішені питання. Наприклад, донині не введено в нормативні документи методики розрахунку коефіцієнта Джоуля-Томсона, яка необхідна для визначення додаткової похибки вимірювання температури газу внаслідок зниження температури при дроселюванні газу на звужувальному пристрої. Така методика запропонована нами у роботі [7] і на її основі може бути розроблений відповідний нормативний документ. Стосовно багатьох інших технічно важливих газів, методи визначення їх фізичних властивостей часто не відповідають вимогам до них з погляду застосування у системах обліку, і потребують подальшої розробки та вдосконалення.

Наведені в цій роботі результати аналізу впливу невизначеностей параметрів фізичних властивостей на невизначеність вимірюваного значення витрати за методом змінного перепаду тиску дають можливість сформулювати вимоги до методів визначення фізичних

властивостей та сформулювати перелік методів, придатних для застосування в задачах обліку газоподібних середовищ. За умови врахування рекомендацій щодо точності методик визначення фізичних властивостей, наведених у цій роботі, вплив невизначеностей фізичних властивостей на невизначеність витрати не перевищує впливу похибок сучасних вимірювальних перетворювачів параметрів потоку, які застосовуються у витратомірах змінного перепаду тиску.

1. ДСТУ ГОСТ 8.586.1-2007 Вимірювання витрати та кількості рідини і газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 1. Принцип методу вимірювання і загальні вимоги. – Київ: Держспоживстандарт України, 2007. – 54 с. 2. ДСТУ ГОСТ 8.586.5-2007 Вимірювання витрати та кількості рідини і газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 5. Методика виконання вимірювань. – Київ: Держспоживстандарт України, 2007. – 92 с. 3. ISO 5168:2005, Measurement of fluid flow – Procedures for the evaluation of uncertainties. 4. ГОСТ 30319.2-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости. 5. Пістун Є.П., Матіко Ф.Д., Лесовий Л.В. Порівняльний аналіз методів розрахунку коефіцієнта стискуваності природного газу // *Наук.-техн. журнал. ІФДТУНГ: Методи та прилади контролю якості.* – 2000. – № 5. – С.46–50. 6. РД 50-213-80. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 319 с. 7. Матіко Ф. Д., Масняк О.Я. Визначення коефіцієнта дроселювання для усунення додаткових похибок систем обліку природного газу // *Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка»: Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація.* – 2008. – № 617. – С. 130–137.