

## МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РІДКОЇ І ГАЗОПОДІБНОЇ ФАЗ

УДК 681.121.84:681.11.035

### МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕРМОКОМПЕНСОВАНИХ ЛАМІНАРНИХ ВИТРАТОМІРІВ

*І.С. Петришин, Т.І. Присяжнюк*

*ДП “Івано-Франківськстандартметрологія”, вул. Вовчинецька, 127, м. Івано-Франківськ,  
76000, тел. (8-03422) 3-02-00, e-mail: dcsms@if.ukrtel.net*

*Проведено метрологічний аналіз ламінарних витратомірів. Визначено причини виникнення температурної залежності результатів вимірювання ламінарних витратомірів. Проведено порівняння метрологічних характеристик термокомпенсованих ламінарних витратомірів та витратомірів традиційної конструкції. Здійснено розрахунок конструктивних параметрів термокомпенсованого ламінарного витратоміра.*

*Произведен метрологический анализ ламинарных расходомеров. Определены причины возникновения температурной зависимости результатов измерений ламинарных расходомеров. Произведено сравнение метрологических характеристик термокомпенсированных ламинарных расходомеров и расходомеров традиционной конструкции. Произведен расчет конструктивных параметров термокомпенсированного ламинарного расходомера.*

*This article contains a metrology analysis of laminar flowmeters, the analysis of origin temperature dependence of laminar flowmeters and comparison of measuring characteristics of laminar flowmeter with compensation temperature dependence of measuring results and usual laminar flowmeter. Also here's the calculation of constructive parameters of laminar flowmeter.*

На сьогодні одним з найбільш ефективних засобів вимірювання витрат газу в діапазоні нижче 0,016 м<sup>3</sup>/год є ламінарний витратомір, принцип роботи якого оснований на вимірюванні гідравлічного опору, створеного капілярною трубкою або набором капілярних трубок. Потреба в доступних ламінарних витратомірах є перш за все: при проведенні метрологічної атестації газоаналітичних засобів вимірювальної техніки, при виготовленні газових сумішей, а також при повірці побутових лічильників газу для визначення їх порогу чутливості.

Проте існуючі конструкції ламінарних витратомірів не дозволяють досягти необхідної точності при вимірюванні витрати в лабораторній та повірочній практиці [1].

Зарубіжними фірмами освоєно серійний випуск витратомірів ламінарного типу [2], принцип дії яких ґрунтується на явищі лінійної втрати тиску на одиницю довжини шляху проходження газу при забезпеченні

ламінарності потоку відповідно до закону Пуазейля-Гагена.

Для забезпечення ламінарності потоку необхідно витримувати число Рейнольдса  $Re$  в номінальному діапазоні витрат меншим від 2300. Для круглого перерізу капіляра число Рейнольдса обчислюється за формулою:

$$Re = \frac{4Q\rho}{\pi\mu D}, \quad (1)$$

де  $Q$  – номінальна об'ємна витрата,  $\rho$  – густина газу,  $\mu$  – динамічна в'язкість газу,  $D$  – діаметр каналу.

Для перерізу довільної форми умовний діаметр  $D_h$  визначається таким чином:

$$D_h = 4F/p, \quad (2)$$

де  $F$  – площа перерізу,  $p$  – повний периметр перерізу.

Це дає змогу використовувати для розрахунку потоків через некруглі перерізи

математичний апарат, розроблений для розрахунку потоків через трубки.

Основним рівнянням вимірювання ламінарного витратоміра є закон Пуазейля, що описує втрату тиску по довжині капіляра [2]:

$$\Delta P = \frac{128\mu L Q}{\pi D^4}, \quad (3)$$

де  $L$  – довжина капілярної трубки.

Відповідно до цього закону витрата газу  $Q$  для циліндричної трубки визначається за формулою:

$$Q = \frac{\Delta P \pi R^4}{2\mu L}, \quad (4)$$

де  $R$  – радіус трубки.

Для витратоміра з плоскою щілиною перепад тиску визначається за формулою [3]:

$$\Delta P = \frac{24QL\mu}{Bh^3}. \quad (5)$$

З урахуванням відхилення від ламінарності потоку, а також впливу густини і коефіцієнта стискуваності та коефіцієнта розширення, рівняння (4) прийме наступний вигляд [4]:

$$\Delta P = \frac{128\mu L Q}{\pi D^4} + \frac{8\rho Q^2}{\pi^2 D^4} (K_c + K_e), \quad (6)$$

де  $K_c$  – коефіцієнт стискуваності газу,  $K_e$  – коефіцієнт розширення газу.

Зміна технологічних параметрів і умов зовнішнього середовища (температури, тиску, вологості) значно впливають на показники точності ламінарного витратоміра. Кожний із впливових чинників, зазвичай, може бути вимірний окремо і врахований при одержанні результатів вимірювань, проте у виробничих умовах експлуатації всіх їх врахувати практично неможливо. Тому кожний ламінарний витратомір поряд з нормованою чутливістю до вимірюваної величини певним чином реагує на різні чинники, які обумовлюють збільшення його похибки.

Головними недоліками ламінарних витратомірів є температурна залежність результатів вимірювання, зумовлена залежністю динамічної в'язкості повітря від температури (зміна температури на 1 К спричиняє, згідно даних, наведених в [5] та табл. 1, додаткову похибку близько 0,3%), індивідуальністю градуувальної характеристики кожного окремо взятого витратоміра через технологічні обмеження та впливом забруднення чутливого

елемента витратоміра на його градуувальну характеристику.

**Таблиця 1 – Залежність динамічної в'язкості повітря від температури**

Температура, °C	Динамічна в'язкість $\mu$ , Па·с · 10 <sup>-5</sup>
0	1,71
5	1,73
10	1,76
15	1,80
20	1,82
25	1,85
30	1,86
40	1,87
50	1,95
60	1,97
70	2,03
80	2,07
90	2,14
100	2,17

Для метрологічного аналізу ламінарних витратомірів спробуємо аналітично описати залежність динамічної в'язкості повітря від температури. На основі даних табл. 1 побудуємо графік (рис. 1), аналіз якого показує практично прямолінійний характер даної залежності.

Методом найменших квадратів знайдемо рівняння апроксимуючої прямої, в результаті чого залежність динамічної в'язкості від температури можна описати формулою:

$$\mu = 4,51 \cdot 10^{-8} \cdot T + 4,87 \cdot 10^{-6}. \quad (7)$$

На рис. 1 точки відображають табличні дані залежності в'язкості повітря від температури, а пряма – апроксимовані дані цієї залежності.

Підставивши рівняння (7) в основне рівняння ламінарного витратоміра, отримаємо рівняння залежності результатів вимірювання від температури:

$$P = \frac{128LQ}{\pi D^4} (4,51 \cdot 10^{-8} \cdot T + 4,87 \cdot 10^{-6}) + \frac{8\rho Q^2}{\pi^2 D^4} (K_c + K_e). \quad (8)$$

Традиційно для температурної компенсації похибки ламінарного витратоміра використовуються електронні коректори, які різко піднімають вартість приладів, знижують їх безпечність і практично виключають можливість створення доступних лабораторних витратомірів.

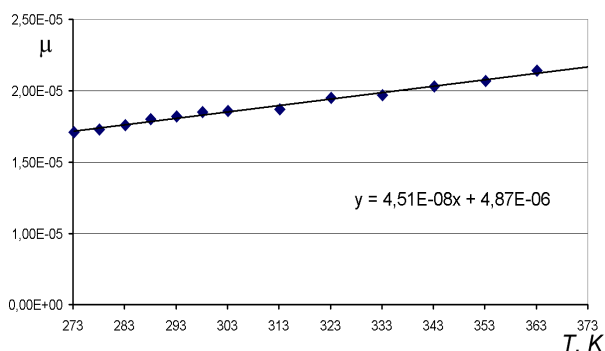


Рисунок 1 - Залежність в'язкості повітря від температури

В [6] наведено спосіб механічної температурної корекції, який реалізовано таким чином, що запропонована конструкція ламінарного витратоміра (рис. 2) дозволяє здійснювати автоматичну механічну корекцію ширини щілини при використанні матеріалів з різним коефіцієнтом лінійного розширення для пластин, які утворюють щілину, та для роздільних пластин. Запропоновано роздільні пластини виготовляти з матеріалу з високим коефіцієнтом лінійного розширення (цинк, алюміній), а пластини, які утворюють щілину – із скла або кераміки. Необхідною умовою компенсації температурної залежності є таке співвідношення товщини роздільних пластин  $d_{роз}$  і пластин, що утворюють щілину  $d_{осн}$  і відповідно їхніх коефіцієнтів лінійного розширення  $\alpha_{роз}$  і  $\alpha_{осн}$ , яке забезпечує потрібне значення температурної корекції на 1 К.

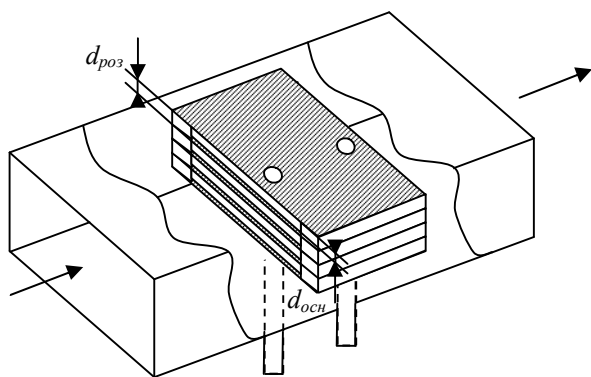


Рисунок 2 – Ламінарний витратомір з серією прямокутних щілин з безпосереднім відбором тиску і температурною корекцією

Товщина пластин змінюється від температури за такою залежністю:

$$d_{осн}(T) = d_{осн0}(1 + \alpha_{осн} \cdot \Delta T), \quad (9)$$

$$d_{роз}(T) = d_{роз0}(1 + \alpha_{роз} \cdot \Delta T), \quad (10)$$

де  $d_{осн0}$  – товщина пластин, що утворюють щілину при температурі 20 °С;  $d_{роз0}$  – товщина роздільних пластин при температурі 20 °С;  $\alpha_{роз}$  – коефіцієнт лінійного розширення роздільних пластин;  $\alpha_{осн}$  – коефіцієнт лінійного розширення пластин, що утворюють щілину;  $\Delta T$  – відхилення температури від 20 °С.

Оскільки висота щілини визначається різницею товщини пластин, тобто

$$h_0 = d_{роз0} - d_{осн0}, \quad (11)$$

то відносну зміну висоти щілини запишемо так:

$$\frac{\Delta h(T)}{h_0} = \frac{(d_{роз}(T) - d_{осн}(T)) - (d_{роз0} - d_{осн0})}{d_{роз0} - d_{осн0}} = \Delta T \frac{\alpha_{роз} d_{роз0} - \alpha_{осн} d_{осн0}}{d_{роз0} - d_{осн0}}, \quad (12)$$

де  $\Delta h(T)$  – зміна висоти щілини від температури,  $h_0$  – висота щілини при температурі 20 °С.

Оскільки  $\frac{\Delta h(T)}{h_0}$  для кожного газу є фіксованим значенням, то позначимо його через  $K_t$ .

Таким чином, для розрахунку товщини пластин термокомпенсованого ламінарного витратоміра при заданій ширині щілини та відносній зміні висоти щілини необхідно розв'язати систему рівнянь:

$$\begin{cases} h_0 = d_{роз0} - d_{осн0}, \\ K_t = \Delta T \frac{\alpha_{роз} d_{роз0} - \alpha_{осн} d_{осн0}}{d_{роз0} - d_{осн0}}. \end{cases} \quad (13)$$

Із рівняння (11) знаходимо  $d_{роз0}$

$$d_{роз0} = h_0 + d_{осн0} \quad (14)$$

і підставимо його в друге рівняння системи рівнянь (13). В результаті отримаємо, що

$$K_t = \Delta T \cdot \frac{\alpha_{роз} \cdot (h_0 + d_{осн0}) - \alpha_{осн} \cdot d_{осн0}}{h_0}. \quad (15)$$

Розв'язавши рівняння (15) відносно змінної  $d_{осн0}$ , отримаємо, що

$$d_{осн0} = \frac{h_0 (K_t - \alpha_{роз} \Delta T)}{\Delta T (\alpha_{роз} - \alpha_{осн})}. \quad (16)$$

Відповідно для відомого значення відносної зміни ширини щілини при зміні температури на 1 К, а також висоти щілини з рівнянь (13) і (15) можна обчислити параметри пластин витратоміра, які забезпечують практично повну відсутність залежності перепаду тиску від температури.

З [6] відомо, що при відхиленні температури на 2 °С відносна зміна висоти щілини повинна складати 0,18%. Для витратоміра, розрахованого на максимальну витрату 0,01 м<sup>3</sup>/год з параметрами  $L=0,2$  м;  $h_0=0,9 \cdot 10^{-3}$  м;  $B=5 \cdot 10^{-3}$  м при номінальній температурі 20 °С, перепад тиску при витраті  $2,778 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с (0,01 м<sup>3</sup>/год) складає 21,067 Па. При цьому, якщо вибрати в якості матеріалів пластин кварцеве скло з  $\alpha_{очн}=0,07 \cdot 10^{-5}$  і алюміній з  $\alpha_{очн}=2,4 \cdot 10^{-5}$ , то основна пластина повинна мати таку товщину:

із скла:

$$d_{очн0} = \frac{0,9 \cdot 10^{-3} \cdot (0,0018 - 2,4 \cdot 10^{-5} \cdot 2)}{2 \cdot (2,4 \cdot 10^{-5} - 0,07 \cdot 10^{-5})} = 3,38 \cdot 10^{-2} \text{ м}, \quad (17)$$

із алюмінію:

$$d_{очн0} = 0,9 \cdot 10^{-3} + 3,38 \cdot 10^{-2} = 3,47 \cdot 10^{-2} \text{ м}. \quad (18)$$

Проведемо метрологічний аналіз ламінарного витратоміра традиційної конструкції і термокомпенсованого ламінарного витратоміра.

Метрологічні характеристики ламінарного витратоміра визначаються наступними параметрами:

- в'язкістю вимірюваного середовища,
- діаметром капіляра,
- довжиною капіляра.

Вплив кожного з цих параметрів можна оцінити частковими похідними.

В загальному випадку при опосередкованих вимірюваннях та відомому рівнянні вимірювань  $Y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  величина сумарної похибки вимірювань  $\Delta_{Y\Sigma\Phi}$  визначається за виразом [7]:

$$\Delta_{Y\Sigma\Phi} = k \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_i} \Delta_{Xi\Phi} \right]^2}, \quad (19)$$

де  $k$  – коефіцієнт, що визначається прийнятою довірчою ймовірністю  $P_3$ ;  $x_i$  –  $i$ -ий параметр, вимірюваний прямим методом;  $n$  – кількість параметрів, вимірюваних прямим методом;  $\Delta_{Xi\Phi}$  –

фактичне значення похибки вимірювання  $i$ -го параметра, вимірюваного прямим методом.

В даному випадку рівняння (19) можна записати так:

$$\Delta_{Y\Sigma\Phi} = 1,1 \sqrt{\left[ \frac{\partial P}{\partial T} \Delta_T \right]^2 + \left[ \frac{\partial P}{\partial L} \Delta_L \right]^2 + \left[ \frac{\partial P}{\partial D} \Delta_D \right]^2}. \quad (20)$$

Вимірювання параметрів здійснюється при  $P_3=95\%$ . Відповідно коефіцієнт  $k$  приймається рівним 1,1.

Часткова похідна по температурі буде такою:

$$\frac{\partial P}{\partial T} = \frac{0,57728 L Q}{\pi D^4}. \quad (21)$$

Часткова похідна по довжині капіляра такою:

$$\frac{\partial P}{\partial L} = \frac{128 Q}{\pi D^4} (4,51 \cdot 10^{-8} \cdot T + 4,87 \cdot 10^{-6}). \quad (22)$$

Часткова похідна по діаметру капіляра такою:

$$\frac{\partial P}{\partial D} = -\frac{512 L Q}{\pi D^5} (4,51 \cdot 10^{-8} \cdot T + 4,87 \cdot 10^{-6}) - 32 \frac{\rho Q^2}{\pi^2 D^5} (K_c + K_e). \quad (23)$$

Для витратоміра традиційної конструкції, розрахованого на максимальну витрату 0,01 м<sup>3</sup>/год з параметрами  $L=0,05$  м;  $D=1,5 \cdot 10^{-3}$  м, який працює в лабораторних умовах на повітрі при номінальній температурі 20 °С при в'язкості  $1,808 \cdot 10^{-5}$  Па/с, перепад тиску при витраті  $2,778 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с (0,01 м<sup>3</sup>/год) складає 21,583 Па. При допустимих геометричних відхиленнях довжини капіляра  $\pm 0,05 \cdot 10^{-3}$  м, його діаметра  $\pm 0,0015 \cdot 10^{-3}$  м і температури  $\pm 2$  °С похибка вимірювання витрати складе

$$\frac{\partial P}{\partial T} \Delta_T = 0,1 \text{ Па}, \quad (24)$$

$$\frac{\partial P}{\partial L} \Delta_L = 0,02 \text{ Па}, \quad (25)$$

$$\frac{\partial P}{\partial D} \Delta_D = -0,081 - 0,006 = -0,087 \text{ Па}, \quad (26)$$

$$\Delta_{Y\Sigma\Phi} = 0,143 \text{ Па}, \quad (27)$$

що при діапазоні вимірювання перепаду тиску 20 Па визначає похибку вимірювання витрати

$$\frac{\Delta_{Y\Sigma\Phi}}{\Delta_P} \cdot 100\% = 0,68\%. \quad (28)$$

При використанні термокомпенсованого ламінарного витратоміра, який працює з оптимальною термокомпенсацією, складову  $\frac{\partial P}{\partial T} \cdot \Delta_T$  можна прийняти рівною нулю за умови повної компенсації зміни в'язкості від температури.

Перепад тиску на такому витратомірі визначається за формулою (5).

Часткова похідна по довжині щілини буде такою:

$$\frac{\partial P}{\partial L} = \frac{24 \cdot Q \cdot (4,51 \cdot 10^{-8} \cdot T + 4,87 \cdot 10^{-6})}{B h^3} \quad (29)$$

Часткова похідна по ширині щілини такою:

$$\frac{\partial P}{\partial B} = - \frac{24 L Q}{\pi B^2 h^3} (4,51 \cdot 10^{-8} \cdot T + 4,87 \cdot 10^{-6}) \quad (30)$$

Часткова похідна по товщині щілини такою:

$$\frac{\partial P}{\partial h} = - \frac{72 L Q}{\pi B h^4} (4,51 \cdot 10^{-8} \cdot T + 4,87 \cdot 10^{-6}) \quad (31)$$

Відповідно, для термокомпенсованого витратоміра, розрахованого за формулами (17) і (18), при вдвічі більших геометричних відхиленнях довжини щілини  $\pm 0,1 \cdot 10^{-3}$  м, ширини і товщини щілини  $\pm 0,003 \cdot 10^{-3}$  м похибка вимірювання витрати складе:

$$\frac{\partial P}{\partial L} \Delta_L = 0,011 \text{ Па}, \quad (32)$$

$$\frac{\partial P}{\partial B} \Delta_B = 0,0032 \text{ Па}, \quad (33)$$

$$\frac{\partial P}{\partial h} \Delta_h = 0,053 \text{ Па}, \quad (34)$$

$$\Delta_{\Sigma\phi} = 0,143 \text{ Па}. \quad (35)$$

Тоді при інших рівних умовах для даної конструкції досягається така похибка вимірювання витрати:

$$\frac{\Delta_{\Sigma\phi}}{\Delta_P} 100\% = 0,28\% \quad (36)$$

Практично це означає можливість створення робочого еталонного витратоміра з класом точності 0,5.

На даний момент на базі ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» проводяться практичні дослідження термокомпенсованого ламінарного витратоміра. Результати досліджень будуть наведені в наступній статті.

## ВИСНОВКИ

При використанні термокомпенсації можливо підвищити метрологічні характеристики ламінарного витратоміра в декілька разів в номінальному діапазоні робочих температур. Ламінарні витратоміри традиційної конструкції доцільно використовувати для технологічних потреб, наприклад, при дозуванні захисних газів в процесах напівавтоматичного і автоматичного зварювання, а термокомпенсовані витратоміри можуть використовуватися для перевірки ротаметрів малих витрат, перевірки порогу чутливості лічильників газу, а також як еталони передавання малих витрат.

## Література

1. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики газа. – Л.: Машиностроение. – 1975. – 776 с.
2. Патент США № 6601460. Flowmeter based on pressure drop across parallel geometry using boundary layer flow including Reynolds numbers above the laminar range / R.A. Materna (США), заявлено 09.06.1999, опубліковано 05.08.2003, Appl. No. 09/328,730 - 29 с.
3. Pierre Delajoud and Martin Girard. A high accuracy, portable calibration standard for low mass flow a high accuracy, portable calibration standard for low mass flow. Presented 1994 September 06 at the XIII IMEKO World Congress of Metrology Torino ITALY.
4. William J. Alvesteffer and Lawrence W. Eget. A laminar flow element with a linear pressure drop versus volumetric flow asme Fluids Engineering Division Summer Meeting, Proceedings of FEDSM'98:1982.
5. Pierre Delajoud and Martin Girard. The need for evolution in standards and calibration to improve process measurement and control of low mass flow. Presented 1996 August 27 at the 1996 NCSL Workshop and Symposium Monterey CA.
6. І.С. Петришин, Т.І. Присяжнюк. Вдосконалення конструкції та підвищення точності ламінарних витратомірів // Український метрологічний журнал. – 2008. – №2. – С. 36-42.
7. ГОСТ 8.381-80. ГСИ. Эталоны. Способы выражения погрешностей. – Введ. 01.01.81. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 9 с.

Поступила в редакцію 01.04.2009р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук,  
доц. Середюк О.Є.