

УДК 681.121.84 : 681.11.035

**ЗАСТОСУВАННЯ СКЛЯНИХ КАПІЛЯРНИХ ТРУБОК ДЛЯ
ВИМІРЮВАННЯ МАЛИХ ВИТРАТ І МІКРОВИТРАТ ГАЗІВ**

© Стасюк І.Д., 2001

Національний університет "Львівська політехніка"

Проаналізована можливість застосування скляних капілярних трубок для вимірювання малих витрат і мікровитрат газів. На підставі експериментальних досліджень витратних характеристик скляних капілярних трубок проаналізована точність різних аналітичних виразів як рівнянь витрати цих трубок. Показана можливість застосування таких трубок як первинних перетворювачів витрати без їх індивідуального градування.

Під час контролю газових потоків, які характерні для нових технологій, зокрема, у виробництві волоконних світловодів, напівпровідникових приладів, інтегральних мікросхем та інших пристроїв мікроелектроніки, під час проведення метрологічної атестації газоаналітичної контрольної-вимірювальної техніки, а також під час виконання науково-дослідних робіт у вказаній галузі необхідно вимірювати малі витрати і мікровитрати різних газів. До мікровитрат газів умовно відносять витрати в межах від 0 до $3,0 \cdot 10^{-6}$ м³/с в трубах діаметром 1 ... 5 мм, а до малих витрат - витрати в межах $3,0 \cdot 10^{-6}$ до $3 \cdot 10^{-3}$ м³/с в трубах діаметром 6 ... 10 мм.

Якість виконання названих завдань залежить від застосованого методу вимірювання витрати, його апаратурної реалізації, а також технічних та метрологічних характеристик цієї апаратури. Для вимірювання малих витрат і мікровитрат газів широке застосування мають витратоміри змінного перепаду тиску [1]. Як первинні вимірювальні перетворювачі витрати в них застосовують пристрої звуження потоку, гідравлічні опори у формі капілярних трубок і струминні перетворювачі [1]. Такі вимірювальні перетворювачі витрати, як правило, вимагають індивідуального градування.

У даній роботі розглянуто витратоміри змінного перепаду тиску, первинні вимірювальні перетворювачі яких виконані у формі гідравлічного опору. Робота таких перетворювачів витрати основана на залежності перепаду тиску ΔP на цьому опорі від витрати Q . Як гідравлічний опір для витратомірів малих витрат і мікровитрат газів можна застосовувати скляні капілярні трубки з циліндричним каналом, які забезпечують ламінарний режим руху газу, а витрату газу визначати за значеннями абсолютних тисків P_1 і P_2

до і після капілярного каналу.

Для опису рівняння витрати $Q = f(P_1, P_2)$ подібних елементів відомо декілька функціональних виразів [1-5]. Розбіжності між результатами розрахунку за різними виразами можуть досягати у деяких випадках 66 % [6]. Точність розрахунку витрати за всіма відомими рівняннями залежить від конструктивних розмірів капілярного каналу - діаметра і довжини, типу залежності $Q = f(P_1, P_2)$ і від числа Рейнольдса Re [5]. Дослідимо вказані чинники, застосовуючи як гідравлічний опір скляні капілярні трубки. Їх виготовляють із скла марки 360 за ГОСТ 1224-71 [7] і застосовують у приладобудівній промисловості для виробництва скляних рідинних термометрів. Геометричні розміри скляних капілярних трубок регламентуються вимогами відповідних технічних умов на ці трубки. Основною конструктивною характеристикою капілярних трубок є мікроскопний номер їх каналу, під яким розуміють одну четверту частину середнього арифметичного значення діаметра по великій і малій осях цього каналу на його торці, вираженого у мікронах (мкм). Завдяки матеріалу, із якого вони виготовлені, скляні капілярні трубки мають високу стійкість до зношування, антикорозійні властивості та можуть працювати у хімічно агресивних середовищах.

Для виготовлення скляних рідинних термометрів застосовують капілярні трубки з діаметром d капілярних каналів у межах 0,06 ... 2 мм (мікроскопні номери відповідно 15 ... 500) і довжиною L цих каналів у межах 150 ... 650 мм. Були досліджені скляні капілярні трубки з циліндричними каналами довжиною 10 ... 300 мм і з діаметрами 0,09 ... 0,3 мм. Так, наприклад, трубки з $d = 0,096$ мм досліджені для довжин від 10 до 290 мм, а з $d = 0,156$ мм і $d = 0,260$ мм відповідно для

довжин від 10 до 280 мм і від 10 до 210 мм. При цьому різниця між сусідніми довжинами досліджуваних капілярів складала 10 мм.

Щоб виявити можливість вимірювання малих і мікровитрат газів з допомогою скляних капілярних трубок без їх індивідуального градування, необхідно дослідити застосування різних рівнянь витрати, у т. ч. відомих [1-5]:

$$Q = \frac{\pi d^4 (P_1^2 - P_2^2)}{256 \mu L R T} ; \quad (1)$$

$$Q = \frac{\pi d^4 P_2}{128 \mu L} \rho_2 \ln \frac{P_1}{P_2} ; \quad (2)$$

$$Q = \frac{\pi d^4 P_2}{128 \mu L} \rho \cdot \frac{\ln \frac{P_1}{P_2}}{1 - (\kappa - 1) \exp\left(\frac{2 - \kappa}{\kappa} \ln \frac{P_1}{P_2}\right)} ; \quad (3)$$

$$Q = \frac{\pi d^4}{128 L} \frac{\rho_2}{\mu} \Delta P , \quad (4)$$

а також отриманого нами [8]

$$Q = \frac{4 \pi \mu L}{m} \left[\sqrt{1 + \frac{m d^4 (P_1^2 - P_2^2)}{512 \mu^2 L^2 R T}} - 1 \right] , \quad (5)$$

де Q - масова витрата газу; μ - коефіцієнт динамічної в'язкості газу; R - газова стала; T - температура газу; ρ_2 - густина газу після гідравлічного опору; ρ - густина газу при нормальних умовах (тиску $P = 101\,325$ Па і температурі $T = 273,15$ К); κ - показник адиабати газу; m - коефіцієнт витрат тиску на входових дільницях капіляра; $\Delta P = P_1 - P_2$.

Для оцінки точності виразів (1)-(5) були експериментально визначені залежності $Q = f(P_1, P_2)$ для різних діаметрів і довжин капілярних каналів скляних трубок. На підставі отриманих даних були визначені похибки δQ розрахунку витрати газу через капілярні канали згідно з (1)-(5). Аналіз цих похибок дав можливість установити найбільш адекватне рівняння витрати.

Похибки розрахунку витрати газу визначалися за формулою

$$\delta Q = \frac{Q - Q_e}{Q_e} \cdot 100 ,$$

де Q і Q_e - відповідно розрахункове і експериментальне значення масової витрати газу для однієї й тієї ж точки витратної характеристики капілярної трубки (для одного й того ж значення перепаду тиску на капілярі).

Експериментальні дослідження були виконані на установці, яка включала редуктори, стабілізатори тиску, взірцеві манометри і термометри, барометр, а також плівковий витратомір [9]. Дослідження проводилися на повітрі в межах перепадів тиску на капілярній трубці від 10 до 160 кПа при атмосферному тиску на виході трубки. У результаті цих досліджень встановлено, що похибки δQ розрахунку витрати залежать в першу чергу від типу залежності $Q = f(P_1, P_2)$ і, крім того, для всіх рівнянь витрати залежать від числа Рейнольдса, діаметра і довжини капілярного каналу. Аналіз залежності похибок δQ розрахунку витрати від вказаних вище чинників для (1)-(5) показав, що як рівняння витрати для досліджених скляних капілярних трубок слід застосовувати вираз (5). Застосовуючи це рівняння, було встановлено, що похибки δQ найменше залежать від діаметра капілярного каналу, його довжини і, що особливо важливо, мало змінюється із зміною перепаду тиску (числа Re) на капілярі. Як приклад на рис. 1 зображена залежність похибки δQ розрахунку витрати від числа Рейнольдса Re для капілярної трубки з $d = 0,260$ мм і $L = 150,5$ мм у випадку протікання через її канал повітря і для тиску P_2 , рівного атмосферному. Номер кривої відповідає номерів виразу, для якого визначена похибка δQ розрахунку витрати. Із графіків видно, що похибка δQ для (1)-(4) суттєво змінюється із зміною числа Re , а для (5) незначно. Так, похибка δQ розрахунку витрати за (5) для цієї капілярної трубки не перевищує 2 %.

Аналогічна картина має місце для капілярних трубок з іншими діаметрами прохідних каналів та іншими довжинами цих каналів. На рис. 2 подана залежність похибки δQ розрахунку витрати за (5) від ΔP у випадку протікання повітря через капілярні трубки із такими конструктивними розмірами: точки \circ - $d = 0,26$ мм і $L = 150,5$ мм; Δ - $d = 0,156$ мм і $L = 150$ мм; \square - $d = 0,096$ мм і $L = 290$ мм; ∇ - $d = 0,096$ мм і $L = 150$ мм. Похибка δQ розрахунку витрати для капілярної трубки з $d = 0,156$ мм і $L = 150$ мм знаходиться в межах (-0,5 ... 0,6) %. Значення цієї ж похибки для капілярних трубок різної довжини з $d = 0,096$ мм знаходиться в таких межах: для $L = 290$ мм - (0,3 ... 1,9) % і для $L = 150$ мм - (-0,2 ... 1,7) %.

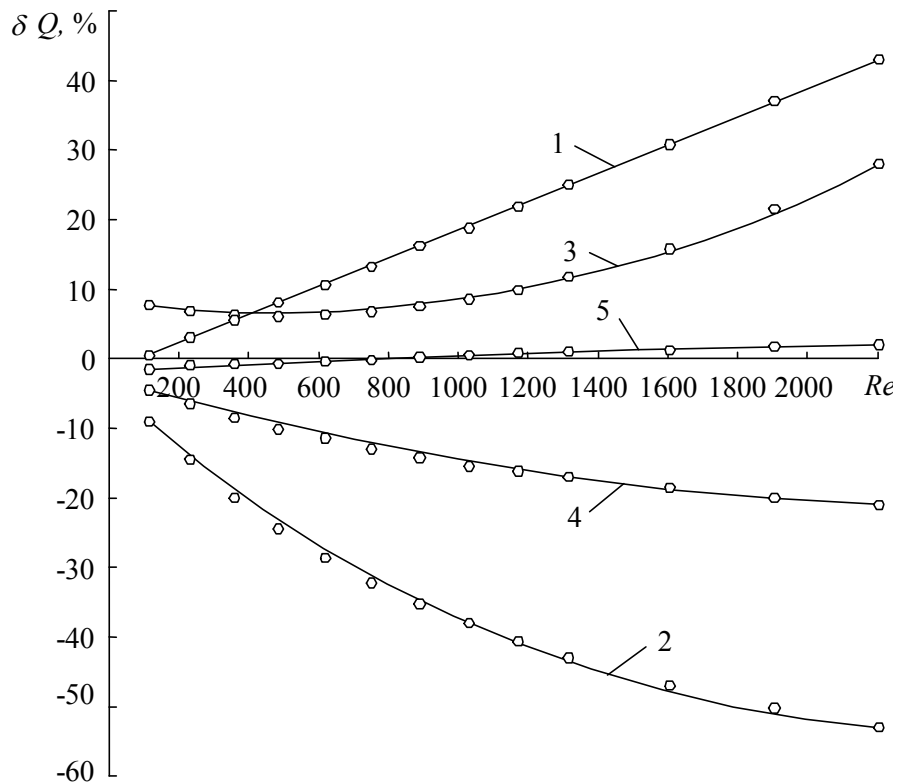


Рис. 1. Графіки залежності від числа Рейнольдса Re похибки δQ розрахунку витрати за виразами (1)-(5) для капілярної трубки з $d = 0,260$ мм і $L = 150,5$ мм у випадку протікання через її канал повітря і для тиску P_2 , рівного атмосферному.

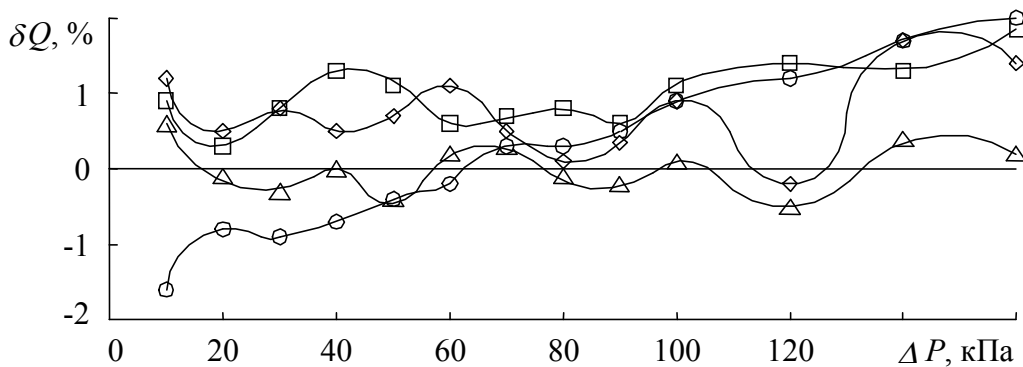


Рис. 2. Графіки залежності похибки δQ розрахунку витрати за виразом (5) від перепаду тиску ΔP у випадку протікання повітря через канали капілярних трубок із такими конструктивними розмірами: \circ - $d = 0,26$ мм і $L = 150,5$ мм; \triangle - $d = 0,156$ мм і $L = 150$ мм; \square - $d = 0,096$ мм і $L = 290$ мм; \diamond - $d = 0,096$ мм і $L = 150$ мм.

Отже, застосування (5) як рівняння витрати для капілярних трубок у дослідженому діапазоні конструктивних розмірів дозволяє використовувати ці трубки як первинні вимірювальні перетворювачі витрати без індивідуального градуювання. Граничні значення відносної похибки вимірювання витрати при цьому знаходяться в межах 4 ... 12 % залежно від діаметра прохідного капілярного каналу - із його збільшенням похибка вимірювання витрати зменшується. Це пояснюється тим, що для різних діаметрів капілярних каналів під час сортування капілярних трубок за діаметром із однаковою абсолютною похибкою значення відносної похибки визначення діаметра d різні.

При цьому похибка δQ визначення витрати газу через досліджені капілярні трубки за (5) має найменше значення для значення коефіцієнта m , рівного 2,8. Як доказ цього у табл. 1 подані похибки визначення витратної характеристики капілярної

трубки з $d = 0,156$ мм і $L = 150$ мм за (5) для уточненого значення $m = 2,8$ і наведеного в [1, 2] значення $m = 1,08$.

Отримана висока точність виразу (5) має місце лише у тих випадках, коли діаметр d капілярної трубки також визначений з високою точністю. Якщо ж під час визначення d допущена похибка, то це призводить до виникнення похибки під час розрахунку Q . У цьому випадку похибка δQ не буде залежати від перепаду тиску на капілярній трубці. Аналогічна ситуація має місце і під час визначення значень довжини L каналу капіляра і коефіцієнта втрат m . Похибка δQ у вказаних випадках є систематичною похибкою, зумовленою неточним визначенням названих початкових параметрів капіляра.

Таблиця 1– Похибки визначення витратної характеристики скляної капілярної трубки з $d = 0,156$ мм і $L = 150$ мм за (5) для наведеного в [1, 2] і уточненого значень коефіцієнта втрат m .

$\frac{\Delta P}{98,0665}$, кПа	$Q_{\text{н}} \cdot 10^9$, кг/с	δQ , %, згідно з виразом (5) для:	
		$m = 1,08$	$m = 2,8$
0,1	62,70	0,7	0,6
0,2	131,67	0,2	-0,1
0,3	206,08	0,2	-0,3
0,4	285,03	0,7	0
0,5	371,05	0,5	-0,4
0,6	458,10	1,4	0,2
0,7	552,21	1,6	0,3
0,8	654,93	1,5	-0,1
0,9	760,28	1,7	-0,2
1,0	867,62	2,2	0,1
1,2	1107,10	2,1	-0,5
1,4	1346,85	3,6	0,4
1,6	1616,35	4,1	0,2

Аналіз точності визначення d , L і m показав, що довжина L капіляра може бути визначена з відносною похибкою 0,01 ... 0,10 %, діаметр d капіляра - з похибкою 2,0 ... 6,0 %. Точність визначення коефіцієнта m до сьогоднішнього дня є відкритим питанням.

Із врахуванням викладеного для підвищення точності вимірювання витрати слід експериментально визначати параметри d і m кожної конкретної капілярної трубки. При цьому вираз (5) доцільно перетворити до форми

$$Q = K_1 \cdot \left[\sqrt{1 + K_2 \frac{(P_1^2 - P_2^2)}{T\mu^2}} - 1 \right] \cdot \mu \quad (6)$$

і експериментально визначити коефіцієнти $K_1 = 4\pi L / m$ і $K_2 = md^4 / 512L^2 R$ за двома значеннями витрати Q_{e1} і Q_{e2} газу через капілярну трубку при двох різних перепадах тиску ΔP_1 і ΔP_2 на цій трубці. Отже, появляється можливість враховувати відхилення геометричних розмірів капілярної трубки від номінальних

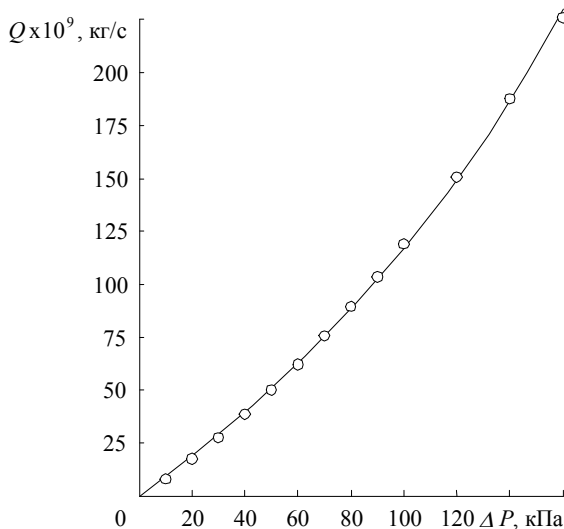


Рис. 3. Графіки експериментальної та розрахованої за виразом (6) витратних характеристик капілярної трубки з $d = 0,100$ мм і $L = 170,5$ мм у випадку протікання через неї повітря.

Витратна характеристика капілярної трубки з $d=0,100$ мм і $L = 170,5$ мм у випадку протікання через неї повітря, розрахована за (6), зображена на рис. 3. Під час розрахунку в (6) підставляли експериментально визначені значення коефіцієнтів K_1 і K_2 , які для даної капілярної трубки відповідно рівні $0,774$ м і $5,65 \cdot 10^{-20}$ К·с². На рис.3. подані також точки, які відповідають експериментально визначеним значенням витрати повітря через цю капілярну трубку при різних значеннях перепаду

тиску на ній (тиск повітря після капілярної трубки рівний атмосферному). Установлено, що у вказаному діапазоні вимірювання максимальне відхилення розрахункових значень витрати повітря через капілярну трубку (за умови застосування (6) і експериментального визначення коефіцієнтів K_1 і K_2 даної трубки) від експериментально визначених значень витрати повітря для цієї ж трубки не перевищують 0,8 %.

Виконані дослідження дають підстави стверджувати про перспективність застосування капілярних трубок як гідравлічних опорів - первинних вимірювальних перетворювачів малих і мікрорасходів газів.

1. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества. - Л.: Машиностроение, 1975.
2. Дембовский В. В. Особенности течения газов в капиллярных каналах // Измерительная техника. - 1968. - № 6. - С. 44-45.
3. Запорожец В. П., Власов Ю. Д., Лавров К. Г. Расчет капилляров, применяемых для дозирования малых количеств газа // Измерительная техника. - 1974. - № 5. - С. 27.
4. Запорожец В. П. Метрологические особенности капиллярного метода измерения вязкости газов // Метрология. - 1975. - № 10. - С. 37-41.
5. Залманзон Л. А. Проточные элементы пневматических приборов контроля и управления. - М.: Изд-во АН СССР, 1961.
6. Стасюк И. Д. Разработка газодинамических дроссельных преобразователей малых и микрорасходов газов: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.11.01 / Каунас. политехн. ин-т им. А. Снечкуса. - Каунас, 1988. - 17 с.
7. ГОСТ 1224-71. Стекло термометрическое. Марки. - М.: Изд-во стандартов.
8. Пистун Е.П., Стасюк И.Д., Теплюх З.Н. Исследование расходных характеристик дроссельных элементов измерительных устройств // Контрольно-измерительная техника. - 1985. - Вып. 38. - С. 44-46.
9. Пистун Е. П., Стасюк И. Д., Теплюх З. Н. Определение расходных характеристик дроссельных элементов // Автоматизация и контрольно-измерительные приборы в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. - 1982. - № 4. - С. 28-30.