

О погрешностях определения среднесуточного значения расхода газа, измеряемого методом переменного перепада давления. 16. ГОСТ 8.586.5-2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. – Ч. 5: Методика выполнения измерений.

УДК 681.121.852.08

І.В. Ділай, О.З. Парнета, З.М. Теплох

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра автоматизації теплових та хімічних процесів

РОЗРАХУНОК І ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ МІРНИХ ТРУБОК ПЛІВКОВИХ ВИТРАТОМІРІВ

© Ділай І.В., Парнета О.З., Теплох З.М., 2007

Запропоновано методику розрахунку оптимальної за конструкцією мірної трубки плівкового витратоміра, яка забезпечує проектування витратоміра для заданих діапазонів витрат і точності вимірювання.

In the article the calculation methods of optimal construction measuring tube of film flowmeters is offered. The methods will guarantee the flowmeter designing for desired range of flow rates and measurement precision.

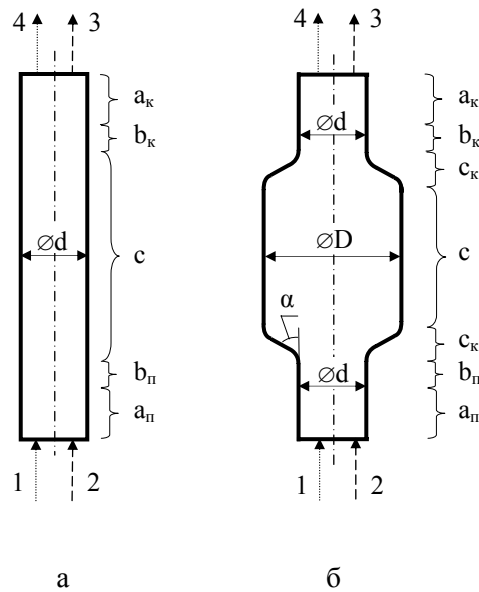
Постановка проблеми. Для вимірювання малих і мікровитрат газів в лабораторних умовах переважно застосовують плівкові витратоміри (ПВ) [1]. Найпростіший ПВ можна виготовити шляхом сполучення через трійник скляної мірної трубки (часто хімічної бюретки) з гумовим балоном, заповненим мильним розчином [2], а для вимірювання часу проходження плівки застосувати ручний секундомір. Проте таке виконання зумовлює не тільки доволі вузький діапазон вимірювання (в найкращих варіантах – $10^{-3} \dots 0,1$ м³/год), невисокі експлуатаційні та метрологічні характеристики приладу, у багатьох випадках фактично перетворює ПВ в індикатор витрати, а в деяких – взагалі унеможливує вимірювання [3]. У той самий час вимірювання з високою точністю малих та мікровитрат газів потрібне в багатьох задачах, наприклад, для градування промислових витратомірів і газоаналітичних вимірювань [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У [3, 5, 6] показано, що потенційні можливості плівкового методу вимірювання є доволі високими і дають змогу створювати якісні витратоміри в діапазоні $10^{-5} \dots 4$ (10) м³/год. Центральною і визначальною частиною ПВ, від якої найбільше залежать точність, діапазон вимірювання і експлуатаційні властивості ПВ, є мірна трубка (МТ) з шаром плівкоутворювальної рідини (ПР) на її внутрішній поверхні та рухомою рідинною плівкою (РП), і тому від її конструктивних характеристик залежать метрологічні та експлуатаційні властивості ПВ [7]. Важливі рекомендації щодо розрахунків і конструкції МТ подані в [3], проте розрахунок і оптимізація геометричних розмірів МТ потребують детальнішого розроблення, зокрема врахування можливостей сучасного рівня оптоелектронної техніки.

Формулювання цілі статті. Метою роботи є підвищення точності, надійності та розширення меж вимірювання малих витрат газів оптимізацією конструкції мірних трубок ПВ згідно з критерієм мінімуму похибки вимірювання витрати.

Основні положення. Базовий варіант МТ у вигляді циліндричної трубки з внутрішнім діаметром d зображено на рисунку. Таке виконання (тобто циліндр з однаковим внутрішнім

діаметром усіх ділянок) для нейтральних газів і газів з параметрами, близькими до лабораторних умов, без особливих проблем застосовують переважно для інтервалу вимірювання витрат 0,1–10 л/год. З цією метою використовують переважно скляні циліндричні трубки з внутрішнім діаметром 10–35 мм і завдовжки 100–500 мм. Діапазон вказаних діаметрів пов'язаний насамперед з умовами існування якісної РП, а діапазон довжин обмежений, з одного боку, мінімальним часом набирання заданої дози (проходженням РП каліброваного об'єму), а з другого, – габаритами приладу. Так, наприклад, під час використання МТ з внутрішнім діаметром 10–20 мм діапазон вимірювання, як правило, становить 1–10 л/год. Похибка вимірювання витрати ПВ з такими МТ може бути на рівні 0,1–0,2 %, якщо врахувати чи усунути усі фактори, які впливають на точність вимірювання [5, 6].



Функціональні ділянки циліндричних мірних трубок однакового діаметра (а)

і з розширеною середньою частиною (б):

a_n і a_k – вхідна та вихідна відповідно; b_n і b_k – фіксації моментів проходження РП відповідно для початку і кінця набирання дози; c – основного об'єму дози;

c_k – конусна перехідна між циліндрами; 1 і 4 – вхід і вихід газу; 2 і 3 – вхід і вихід РП

Проблеми виникають вже при намаганні побудувати МТ для витрат, більших за 10 л/год, зокрема, для активних (агресивних, реактивних, розчинних тощо) газів та для газів з параметрами стану, значення яких значно відрізняються від їх значень в лабораторних умовах. В такому випадку необхідно застосовувати спеціальні заходи, наприклад, розширювати діаметр середньої частини МТ і підбирати відповідні плівкоутворювальні рідини.

Проте збільшення діаметра МТ призводить до збільшення площі поверхні РП, а тим самим до збільшення деформації плівки та її нестабільності. Ці явища в сукупності з обмеженням максимальної швидкості руху плівки визначають верхню границю вимірювання витратоміра, яка може в окремих випадках досягати 3600 л/год [1]. Загалом застосування МТ з діаметрами, більшими за 50 мм, істотно зменшує надійність вимірювання витрати, особливо під час застосування органічних плівкоутворювальних речовин [5]. Нижня границя вимірювання МТ з великими діаметрами обмежена часом проходження РП каліброваних міток, який практично не повинен перевищувати кількох хвилин, тому що збільшення тривалості часу проходження міток призводить до зростання похибки вимірювання (трансфузія газу через плівку, зростання впливу об'єму РР у каліброваному об'ємі тощо).

Для вимірювання витрат, більших за 80 л/год, з метою побудови компактної МТ розширюють її середню частину [7], при цьому переходи між різними діаметрами повинні бути плавними, щоб запобігати руйнуванню плівки (рисунок). Проте надійність вимірювань у цьому випадку також зменшується.

Аналіз теоретичних і експериментальних досліджень ПВ показує також, що від конструкції та геометричних розмірів МТ істотно залежать похибки вимірювань витрати.

Розрахункові залежності. Плівковий витратомір реалізує абсолютний метод вимірювання витрати газу, який полягає у вимірюванні часу τ проходження РП (міткою границі дози газу) між двома (верхньою та нижньою) фіксованими відмітками МТ, які визначають калібрований об'єм V газу, і обчисленні об'ємної витрати Q за формулою

$$Q = V / \tau. \quad (1)$$

Оскільки витрата визначається параметрами V і τ , які залежать від геометричних розмірів МТ, то їх вибір повинен ґрунтуватися на критеріях, які визначають якість вимірювання. Основним таким критерієм є точність, у зв'язку з чим розглянемо похибки визначення параметрів V і τ .

Гранична відносна похибка вимірювання часу τ дорівнює

$$\delta_\tau = \frac{\Delta_\tau}{\tau} = \Delta_\tau \cdot \frac{Q_{max}}{V}, \quad (2)$$

де Δ_τ – абсолютна похибка реакції відлікової системи; Q_{max} – верхня границя вимірювання ПВ.

Похибка Δ_τ є порівняно постійною для конкретної відлікової системи, але відносна похибка δ_τ визначається конструкцією МТ (зокрема величиною V) і величиною Q_{max} .

Відтворення V відліковою системою у ПВ відбувається з абсолютною похибкою Δ_V , яка залежить як від конструкції МТ, так і від властивостей відлікової системи, тобто

$$\Delta_V = S_b \cdot \Delta_l, \quad (3)$$

де S_b – площа перерізу МТ в місцях знаходження каліброваних відміток; Δ_l – абсолютна гранична похибка встановлення місцезнаходження двох (нижньої та верхньої) міток відліковою системою.

Похибка Δ_l відлікової системи залежить від швидкості v РП, але якщо обмежити цю швидкість величиною v_{max} , яка залежить від швидкодії відлікової системи, то похибку Δ_l можна вважати сталою величиною для $v \leq v_{max}$. Якщо ж тепер врахувати, що для дотримання цієї умови найменший допустимий переріз повинен становити

$$S_b^{min} = Q_{max} / v_{max}, \quad (4)$$

то гранична відносна похибка δ_V відтворення V визначиться як

$$\delta_V = \frac{\Delta_V}{V} = \frac{S_b^{min} \cdot \Delta_l}{V} = \frac{\Delta_l}{v_{max}} \cdot \frac{Q_{max}}{V}. \quad (5)$$

Похибки δ_τ і δ_V залежать від якості відлікової системи (ВС). Так, візуальна (В) ВС, тобто коли відбувається візуальне фіксування моментів проходження РП каліброваних відміток і ручне ввімкнення/вимкнення секундоміра, характеризується такими значеннями параметрів: $\Delta_\tau = 0,2$ с, $\Delta_l = 1$ мм, $v_{max} = 0,04$ м/с [3].

Застосування автоматизованої (А) ВС зменшує похибки Δ_τ та Δ_l і збільшує максимальну допустиму швидкість РП, внаслідок чого зменшуються δ_τ і δ_V . Залежно від якості оптоелектронної пари давачів місцезнаходження РП і засобів вимірювання часу проходження РП каліброваного об'єму можливі такі характеристики автоматизованої ВС:

звичайна (А₁) автоматизована ВС – $\Delta_\tau = 0,02$ с, $\Delta_l = 0,1$ мм, $v_{max} = 0,4$ м/с;

високоякісна (А₂) автоматизована ВС – $\Delta_\tau = 0,002$ с, $\Delta_l = 0,01$ мм, $v_{max} = 4$ м/с.

Як бачимо з (2) і (5), похибки δ_τ і δ_V залежать від значення V , що дає змогу оптимізувати розміри МТ залежно від заданої похибки δ_Q визначення витрати Q . Критерієм оптимізації є мінімум похибки $\delta_{\tau V} = \delta_\tau + \delta_V$, тобто

$$\delta_{\tau V}^{min} = \left(\Delta\phi + \frac{\Delta l}{v_{onm}} \right) \cdot \frac{Q_{max}}{V_{onm}}, \quad (6)$$

де $v_{opt} \leq v_{max}$ і $V_{opt} \geq V_{min}$.

Нехай похибка δ_Q складається з основної похибки $\delta_{\tau V}$ і додаткової δ_R , яка включає в себе усі інші можливі похибки, пов'язані з неконтрольованими змінами температури і тиску газу, взаємодії газу з ПР тощо [5]. Значення додаткової похибки δ_R визначається рівнем (якістю) виконання (РВ) ПВ і для точних (Т) вимірювань становить $\delta_R = 0,08\%$, а для найвищої точності (М) – $\delta_R = 0,05\%$. Під час вимірювання температури, тиску звичайними засобами, що відповідає звичайному (3) РВ, похибка становить $\delta_R = 0,17\%$ [3].

Із (6), враховуючи, що $\delta_{\tau V} = \delta_Q - \delta_R$, можна одержати формулу для визначення об'єму V_{min} МТ, який забезпечить вимірювання витрати до Q_{max} із похибкою, що не перевищує заданої δ_Q . Отже, для визначення достатнього об'єму МТ основною залежністю є

$$V_{min} = \frac{\Delta\phi + \Delta l / v_{max}}{\delta_Q - \delta_R} \cdot Q_{max} = k_\delta \cdot Q_{max}. \quad (7)$$

Залежність для визначення найменшого внутрішнього діаметра d_{min} ділянок фіксації моментів проходження РП, який забезпечує умову $v \leq v_{max}$, отримаємо з формули (4)

$$d_{min} = 2 \sqrt{Q_{max} / (\pi \cdot v_{max})}. \quad (8)$$

За допомогою формул (4) і (7) можна отримати залежність для знаходження найменшої довжини l_{min}^d каліброваної частини циліндричної МТ з внутрішнім діаметром d_{min} у вигляді

$$l_{min}^d = k_\delta \cdot v_{max}. \quad (9)$$

Формулу розрахунку загальної довжини L_d циліндричної МТ з внутрішнім діаметром d_{min} можна подати так:

$$L_d = l_{min}^d + l_{an} + l_{ak} + l_{bn} + l_{bk}, \quad (10)$$

звідки прийнявши, що $l_{an} = l_{ak}$ і $l_{bn} = l_{bk}$, отримаємо

$$L_d = l_{min}^d + 2(l_{an} + l_{bn}), \quad (11)$$

де l_{an} – довжина вхідної ділянки (зазвичай, $l_{an} = 50 \dots 100$ мм); l_{bn} – довжина ділянки фіксації моментів проходження плівки (зазвичай, $l_{bn} = 20 \dots 30$ мм).

Найменшу довжину l_{min}^D МТ із розширеною середньою частиною з внутрішнім діаметром D можна визначити за формулою

$$l_{min}^D = k_\delta \cdot v_{max} / n^2, \quad (12)$$

де $n = D / d_{min}$; D – внутрішній діаметр ділянки основного об'єму дози МТ із розширеною середньою частиною.

Як бачимо з (12), значення довжини ділянки основного об'єму дози МТ з розширеною середньою частиною зменшується в n^2 разів.

Формула розрахунку загальної довжини L_D МТ з розширеною середньою частиною має вигляд

$$L_D = l_{min}^D + l_{an} + l_{ak} + l_{bn} + l_{bk} + 2l_k, \quad (13)$$

де $l_k = (D-d)/2 \cdot \text{ctg} \alpha$; l_k – довжина конусної перехідної частини між циліндрами з внутрішніми діаметрами d і D ; α – кут між віссю МТ та твірною зрізаного конуса.

Якщо прийняти, що $l_{an} = l_{ak}$ і $l_{bn} = l_{bk}$, то отримаємо

$$L_D = l_{min}^D + 2(l_{an} + l_{bn} + l_k). \quad (14)$$

Варто зазначити, що загальна довжина L_D може бути дещо зменшена, оскільки об'єм основної дози збільшується за рахунок ділянок l_{bn} і l_{bk} фіксації моментів проходження РП та двох конусних перехідних частин l_k .

Наведені формули (7)–(12) накладають обмеження на геометричні розміри МТ з огляду на задані похибку δ_Q , витрату Q_{max} , тип ВС та рівень виконання. У той самий час існують обмеження на можливість якісного вимірювання найменшої витрати Q_{min} з огляду на максимальний час τ_{max} проходження РП між верхньою та нижньою фіксованими відмітками МТ. Ці обмеження спричинені часом тривалості циклу вимірювання витрати, деструктивними явищами у шарі ПР на внутрішній поверхні МТ, стабільністю РП тощо. З врахуванням наведених залежностей одержуємо формули для знаходження Q_{min} і кратності q границь вимірювання у вигляді

$$Q_{min} = V_{min} / \tau_{max}; \quad q = Q_{max} / Q_{min} = \tau_{max} / k_{\delta}. \quad (15)$$

Похибка δ_Q вимірювання витрати МТ оптимізованих конструкцій дорівнює

$$\delta_Q = \frac{\Delta\tau + \Delta l / v_{max}}{V} \cdot Q_{max} + \delta_R. \quad (16)$$

Мінімальне значення часу τ_{min} проходження РП каліброваного об'єму МТ

$$\tau_{min} = V / Q_{max}, \quad (17)$$

а мінімальне значення витрати Q_{min} , яке можна виміряти за допомогою МТ оптимізованої конструкції

$$Q_{min} = V / \tau_{max}, \quad (18)$$

причому як з міркувань зменшення циклу вимірювань, так і для підвищення якості вимірювань τ_{max} , доцільно обмежити значенням 5 хв.

Приклади проектування МТ ПВ. На основі формул (7)–(18) були розраховані різні варіанти мірних трубок ПВ для заданих максимального значення витрати Q_{max} , похибки δ_Q її вимірювання, а також для різних типів відлікової системи та рівня виконання. У таблиці наведені приклади конструкцій МТ ПВ у базовому та оптимізованому виконаннях, серед яких деякі були перевірені експериментально [3]. Ці приклади наочно демонструють можливості та властивості ПВ, які визначаються конструкцією МТ.

Геометричні розміри МТ і характеристика якості ПВ

№ з/п	Завдання			Тип ВС, РВ	Обмеження МТ			Оптимізовані конструкції (проект або реалізація) МТ							
	Q_{max}		δ_Q , %		V_{min} л	d_{min} мм	l_{min}^d м	d мм	D мм	L_{min} см	V л	τ_{min} с	Q_{min} л/год	q	δ_Q %
	л/с	л/год													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0,002	8	2	В,З	0,0342	9,4	49	10	10	45	0,035	12,7	0,424	24	2
2				В,Т	0,0325	9,4	47	10	10	42	0,033	11,9	0,396	25	2
3			0,25	В,Т	0,368	9,4	529	30	30	52	0,37	133	4,44	2,3	0,25
4				А ₁ ,Т	0,0331	3	476	10	10	43	0,034	12,2	0,408	24	0,25
5				А ₂ ,Т	0,0033	0,9	471	10	10	20	0,016	5,8	0,192	52	0,12
6				А ₂ ,М	0,0056	0,9	801	10	10	20	0,016	5,8	0,192	52	0,09

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
7	0,028	100	2	B,З	0.3443	29.9	49.2	35	35	45	0.4330	15.5	5.1954	19.4	1.63
8				B,Т	0.3281	29.9	46.9	35	35	42	0.4041	14.4	4.8490	20.8	1.64
9			0,25	B,Т	3.7059	29.9	529	30	85	65	3.9017	139.3	46.8	2.2	0.24
10				A ₁ ,Т	0.3335	9.4	476	30	30	48	0.3393	12.1	4.07	24.8	0.25
11				A ₂ ,Т	0.0330	3.0	471	12	12	35	0.0396	1.4	0.475	212	0.22
12			0,15	A ₂ ,М	0.0561	3.0	801	15	15	35	0.0619	2.2	0.7422	136	0.14
13	0,8	2880	-	B,Т	-	160	-	60	150	80	14	17,5	168	17	>5
14	1	3600	0,25	A ₁ ,Т	11,9	56	476	56	150	77	12	12	144	25	0,25
15				A ₂ ,Т	1,2	18	471	20	80	51	2,1	2,1	25,2	143	0,18
16			0,15	A ₂ ,М	2	18	801	20	80	51	2,1	2,1	25,2	143	0,15
17	2,8	10 ⁴	0,25	A ₂ ,М	2,8	30	400	30	93	51	2,86	1	34,3	292	0,25
18			0,15	A ₂ ,М	5,6	30	801	40	100	81	5,7	2	68,4	146	0,15

Для того, щоб спроектувати МТ ПВ, спочатку необхідно знайти обмеження для неї у базовому виконанні, що передбачає знаходження мінімальних об'єму V_{min} , діаметра d_{min} та довжини l_{min}^d відповідно із (7)–(9). Розрахунок цих параметрів МТ вимагає задання характеристик ВС, а саме: абсолютних похибок вимірювання часу Δ_τ і місцезнаходження Δ_l двох міток, а також максимально допустимої швидкості v_{max} РП.

Коментарі та рекомендації. Аналіз наведених в таблиці базових та оптимізованих конструкцій МТ показує наступне.

Для вимірювання витрат газу до 100 л/год МТ можна виконувати циліндричними. У разі, коли довжина l_{min}^d базової конструкції є неприйнятною, наприклад більшою за 500 мм, то її довжину можна зменшити збільшенням внутрішнього діаметра d_{min} МТ (див. варіанти № 3–6).

Візуальну ВС можна застосовувати для витрат близько 100 л/год із забезпеченням високої точності вимірювання. Для більших витрат, наприклад близько 1000 л/год, і застосування візуальної ВС похибка δ_Q вимірювання витрати зростає (наприклад, до 2 %), проте для неособливо відповідальних вимірювань залишається допустимою. Для вимірювання ще більших витрат похибка стає недопустимо великою, так, наприклад, наведений в таблиці варіант №13 реального виконання МТ із візуальною ВС для витрат до 2,88 м³/год, як показали експериментальні дослідження, не забезпечує достатньої точності вимірювань [3].

Вимірювання витрат в діапазоні від 100 л/год до 10 м³/год вимагає конструювання МТ з розширеною середньою частиною.

Вимірювання витрат від 0,1 до 10 м³/год з малими похибками можливе лише з використанням автоматизованої ВС.

У разі, коли внутрішній діаметр розширеної частини МТ перевищує 80 мм (див., наприклад, варіанти № 14, 18) доцільним є застосування спеціальних заходів підвищення стабільності рухомої плівки, пов'язаних, наприклад, із встановленням для неї додаткової опори, зокрема, коаксіально розміщених у МТ вставних елементів [7].

Кратність q границь вимірювання ПВ є достатньо високою, особливо для автоматизованих вимірювальних систем, коли вона може сягати значення кількох сотень.

Висновки. На основі виконаного аналізу похибок вимірювання витрати розроблено методику розрахунку та конструювання МТ ПВ, яка забезпечує отримання оптимальних геометричних

розмірів МТ залежно від заданої похибки вимірювання витрати, діапазону вимірювань, типу відлікової системи та якості реалізації ПВ.

1. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. – 4-е изд. – Л.: Машиностроение, 1989. – 709 с. 2. Френкель Б.А. Измерение малых и микрорасходов продуктов нефтехимических производств. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1973. – 116 с. 3. Levy A. The accuracy of the bubble meter method for gas flow measurements // J. Scien. Instrum. – 1964. – Vol. 41. 4. Приборы для хроматографии / К.И. Сакодынский, В.В. Бражников, С.А. Волков, В.Ю. Зельвенский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с. 5. Теплюх З.М., Парнета О.З. Аналіз похибок плівкового витратоміра газу // Вимірювальна техніка та метрологія: Міжвід. наук.-техн. зб. – Львів, 2003. – Вип. 62. – С. 114–119. 6. Теплюх З.М., Парнета О.З. Високоточний плівковий витратомір // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2004. – № 506. – С. 275–282. 7. Теплюх З.М., Парнета О.З. Вимірювальні бюретки плівкових витратомірів газу // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ, 2000. – № 6. – С. 64–68.