

Крім того, вимірювальний перетворювач, розроблений на основі нової мостової ТВС значно простіший і технологічніший за конструкцією, дасть змогу зменшити час вимірювання у порівнянні з попередньою розробкою.

1. Геращенко О.А., Грищенко Т.Г. Приборы для теплофизических измерений: Каталог. – К., 1991. 2. Теплофизические измерения и приборы / Под общей ред. Е.С. Платунова. – Л.: Машиностроение, 1986. 3. ГОСТ 7076-99. Міждержавний стандарт. Матеріали і вироби будівельні. Метод визначення теплопровідності і термічного опору в стаціонарному тепловому режимі. – К.: Держстандарт України, 2000. 4. Васильківський І.С., Юсик Я.П. Вимірювальний перетворювач теплопровідності будівельних матеріалів на основі нової зрівноваженої мостової схеми // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація". – Львів, 2009. – № 659. 5. ДСТУ 2568-94. Метрологія. Державна служба стандартних довідкових даних України. Основні положення. – К.: Держстандарт України, 1994.

УДК 681.2.53.082.32

І.В. Ділай, З.М. Теплюх

Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів

ГАЗОДИНАМІЧНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ДІАМЕТРА ПРОХІДНОГО КАНАЛУ КАПІЛЯРА

© Ділай І.В., Теплюх З.М., 2010

Наведено залежності для визначення ефективного діаметра прохідного каналу капілярного елемента на основі експериментального дослідження параметрів потоків газу через капіляр. Одержані залежності забезпечують адекватність моделювання і достатню точність розрахунку дросельних схем на основі капілярних елементів. Оцінено граничну похибку визначення діаметра.

In the article the dependences for effective diameter value definition of straightway canal capillary element on the grounds of experimental investigation of gas flow parameters through capillary element are induced. The dependences ensure model adequacy and high precision of throttled scheme calculation on base of capillary elements. The boundary inaccuracy of diameter definition is evaluated.

Висвітлення предмета. Дроселі є одними з основних елементів різноманітних газодинамічних засобів автоматики і контролю, зокрема вимірювальних перетворювачів, пристроїв для приготування газових сумішей заданого складу, задавачів витрати тощо [1–4]. Геометричні розміри прохідних каналів дросельних елементів є тими параметрами, які насамперед визначають найважливіші експлуатаційні та метрологічні характеристики цих засобів (наприклад, точність задання складу приготавливаних газових сумішей, витрату дозованого газового середовища), а тому розроблення та вдосконалення методів визначення розмірів прохідних каналів дросельних елементів є безперечно актуальним.

Аналіз досліджень і публікацій показує, що для побудови сучасних газодинамічних засобів застосовують різні типи дроселів (капілярну трубку, діафрагму, сопло, сопло-заслінку, конус-діафрагму тощо), газодинамічні опори (провідності) яких повинні мати точно задані значення [2, 5]. Проте найперспективнішими для їх побудови (наприклад, синтезаторів газових сумішей чи задавачів витрати) є застосування як дозуючих елементів скляних капілярних трубок з

циліндричним прохідним каналом. Як переваги останніх відзначимо: незмінність форми прохідного каналу; незношуваність внутрішньої поверхні капіляра; малий коефіцієнт лінійного розширення скла і, що найголовніше, можливість плавної зміни газодинамічного опору (витрати) скороченням довжини каналу.

Основними конструктивними характеристиками капілярного елемента є значення діаметра і довжини його прохідного каналу. І якщо визначення довжини прохідного каналу капіляра не викликає особливих труднощів, оскільки доступними засобами вимірювання лінійних розмірів, наприклад, мікрометром, можна забезпечити його вимірювання з похибкою на рівні кількох сотих міліметра, то визначення діаметра каналу капілярної трубки є доволі складним завданням [6]. Це пов'язано з тим, що, по-перше, прохідний канал має відхилення від форми циліндра, а по-друге, значення діаметрів застосовуваних нами капілярних елементів є порівняно малими (як правило, менше 0,5 мм). Відхилення форми поперечного перерізу прохідного каналу зумовлене недосконалістю технології виробництва капілярних трубок [7], внаслідок чого поперечний переріз прохідного каналу може мати форму овалу або іншу (неправильну). Крім того, спостерігається відхилення профілю внутрішніх стінок від прямолінійності, внаслідок чого прохідний канал може бути конусоподібним, бочкоподібним чи іншим. При цьому відхилення від циліндричності можуть сягати 14 % [7]. У зв'язку з цим стосовно прохідних каналів скляних капілярних трубок можна говорити про *середній* діаметр, а з врахуванням того, що для вказаних відхилень прохідного каналу від циліндричної форми потік газу зазнає відповідних деформацій, потрібно мати *ефективний* діаметр, який, крім іншого, частково компенсує ці відхилення.

Мета роботи – визначити ефективний діаметр прохідного каналу капілярного елемента на основі експериментальних даних дослідження параметрів потоків газу через капіляр.

Відомі методи визначення діаметра прохідного каналу капіляра. Для визначення діаметра прохідного каналу капілярних елементів найчастіше використовують такі методи: ваговий, електролітичний, оптичний та пневматичний.

Ваговий метод визначення діаметра прохідного каналу капілярного елемента полягає у знаходженні ваги стовпчика ртуті, якою заповнюють канал капіляра, як різниці ваги капіляра із заповненим ртуттю каналом і ваги самого капіляра [8]. За значенням ваги стовпчика ртуті в каналі капіляра і виміряного значення довжини стовпчика ртуті у прохідному каналі трубки (з врахуванням менісків на кінцях стовпчика ртуті) розраховують середнє значення діаметра. Знаходження діаметра капіляра цим методом є складним, вимагає зразкового обладнання для зважування малих мас і вимірювання довжин з високою точністю, розрахунку менісків, а також запобіжних заходів під час роботи з ртуттю та створення спеціальних умов для роботи з нею [6]. З урахуванням вказаних особливостей використання цього методу потребує високої кваліфікації персоналу і можливе лише у спеціалізованих лабораторіях.

Визначення діаметра капіляра електролітичним методом ґрунтується на вимірюванні електричного опору стовпчика електроліту, яким заповнюють прохідний канал капіляра. За виміряним значенням опору стовпчика електроліту в каналі та довжиною прохідного каналу вираховують середній діаметр капілярної трубки. На перший погляд метод може забезпечити високу точність, оскільки вимірювання електричного опору і довжин стовпчика електроліту, який дорівнює каналу капіляра, не створює особливих труднощів. Проте визначальним недоліком цього методу є потреба у визначенні з високою точністю електропровідності електроліту [9].

Серед оптичних методів визначення діаметра прохідного каналу капіляра виокремимо той, який застосовується у промисловості завдяки його простоті, суть якого полягає у вимірюваннях мікроскопом взаємно перпендикулярних діаметрів прохідного каналу на торцях капіляра з усередненням отриманих чотирьох значень [10]. Результатом цих вимірювань є присвоєний так званий капілярний номер N , який обчислюють за формулою $N=d/4$, де d – значення середнього діаметра капіляра в мкм. Капілярним номером, зокрема, користуються у різних виробництвах для вибору капілярів певного діаметра.

Важливо відзначити те, що за допомогою вагового та електролітичного методів знаходять власне середнє значення діаметра капіляра (по усій довжині прохідного каналу капілярної трубки), тоді як за останнім лише середнє за чотирма вимірними значеннями діаметра на обох торцях трубки з похибкою на рівні 1–2 %. З врахуванням недосконалості технології виготовлення скляних капілярних трубок отриманий за капілярним номером трубки номінальний діаметр значно відрізняється від фактичного середнього значення діаметра капіляра. Тому для побудови точних газодинамічних пристроїв присвоєне значення номінального діаметра капілярної трубки є недостатнім, а для отримання реального значення середнього діаметра потрібно проводити додаткові дослідження, використовуючи інші методи.

У практиці визначення середнього діаметра капілярів використовують також пневматичні методи [11–13]. Основним недоліком цих методів є необхідність застосування зразкових дросельних елементів, тобто дроселів з точно відомим діаметром прохідного каналу [7, 8, 14].

Визначення ефективного діаметра прохідного каналу капіляра. Запропонований газодинамічний метод визначення ефективного діаметра прохідного каналу капілярного елемента має ті переваги порівняно з названими, що не вимагає зразкових капілярів, може бути максимально наближений до реальних умов роботи дроселя, зокрема, дозує те саме газове середовище і з тими самими параметрами стану, яке безпосередньо використовують в роботі того чи іншого газодинамічного пристрою. Все це забезпечує вищу точність визначення діаметра порівняно з відомими методами.

Метод передбачає багаторазове вимірювання витрати газу через досліджуваній капілярний елемент за допомогою витратовимірної установки на основі плівкового витратоміра для заданих значень абсолютних тисків на вході і виході капілярної трубки [15].

В основу розрахунку ефективного діаметра покладено залежність, яка є найточнішою (адекватною) математичною моделлю витратної характеристики капілярного елемента [5]:

$$G = \frac{4\pi\mu l}{m} \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{md^4 \cdot B}{512\mu^2 \cdot l^2 \cdot R_2 \cdot T}} - 1 \right], \quad (1)$$

де G – масова витрата газу через капіляр; d і l – відповідно діаметр і довжина прохідного каналу капіляра; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості газу за температури T ; R_2 – газова стала; $B = P_v^2 - P_w^2$ – комплекс тисків; P_v , P_w – значення абсолютного тиску відповідно на вході і виході капіляра; m – коефіцієнт кінцевих ефектів. Абсолютний тиск на вході капілярної трубки визначають як суму надлишкового і абсолютного тисків на виході капіляра: $P_v = P^h + P_w$.

Для визначення діаметра прохідного каналу капіляра необхідно скласти систему двох рівнянь на основі залежності (1), записаних відповідно для i -ї та j -ї експериментально отриманих точок. Система має такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} G_i &= \frac{4\pi\mu_i l}{m} \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{md^4 \cdot B_i}{512\mu_i^2 \cdot l^2 \cdot R_2 \cdot T_i}} - 1 \right]; \\ G_j &= \frac{4\pi\mu_j l}{m} \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{md^4 \cdot B_j}{512\mu_j^2 \cdot l^2 \cdot R_2 \cdot T_j}} - 1 \right]. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

З системи (2) отримаємо рівняння для визначення d , в якому виключений коефіцієнт m :

$$d = \left[\frac{256 \cdot l \cdot R_2}{\pi} \cdot \frac{G_i \cdot G_j \cdot T_i \cdot T_j \cdot (G_i \cdot \mu_j - G_j \cdot \mu_i)}{G_i^2 \cdot T_i \cdot B_j - G_j^2 \cdot T_j \cdot B_i} \right]^{0,25}. \quad (3)$$

Оскільки за допомогою плівкового витратоміра в процесі експериментальних досліджень вимірюють об'ємну Q , а не масову G витрату, то залежно від (3) доцільно перейти до об'ємних витрат з врахуванням того, що

$$G = Q \cdot \rho_w; \quad \rho_w = P_w / (R_2 \cdot T). \quad (4)$$

Після нескладних перетворень з врахуванням (4) залежність для визначення діаметра капіляра (3) набуває вигляду

$$d = \left[\frac{256 \cdot l}{\pi} \cdot \frac{Q_i \cdot Q_j \cdot P_{wi} \cdot P_{wj} \cdot (Q_i \cdot P_{wi} \cdot \mu_j \cdot T_j - Q_j \cdot P_{wj} \cdot \mu_i \cdot T_i)}{B_j \cdot Q_i^2 \cdot P_{wi}^2 \cdot T_j - B_i \cdot Q_j^2 \cdot P_{wj}^2 \cdot T_i} \right]^{0,25}. \quad (5)$$

У разі забезпечення під час експерименту постійної температури ($T_i = T_j = T$) вимірюваного газового потоку незмінною залишається і його в'язкість ($\mu_i = \mu_j = \mu$) і залежність (5) можна подати так:

$$d = \left[\frac{256 \cdot l}{\pi} \cdot \mu \cdot \frac{Q_i \cdot Q_j \cdot P_{wi} \cdot P_{wj} \cdot (Q_i \cdot P_{wi} - Q_j \cdot P_{wj})}{B_j \cdot Q_i^2 \cdot P_{wi}^2 - B_i \cdot Q_j^2 \cdot P_{wj}^2} \right]^{0,25}. \quad (6)$$

Якщо, крім постійної температури газу, вимірювання здійснювати і за сталого абсолютного тиску на виході капіляра ($P_{wi} = P_{wj} = P_w$), то (6) можна записати у вигляді

$$d = \left[\frac{256 \cdot l}{\pi} \cdot \mu \cdot \frac{Q_i \cdot Q_j \cdot P_w \cdot (Q_i - Q_j)}{B_j \cdot Q_i^2 - B_i \cdot Q_j^2} \right]^{0,25}. \quad (7)$$

Послідовність визначення діаметра капілярної трубки на основі формул (5)–(7) є такою.

За допомогою експериментальної установки визначають витрату для $n=10\dots15$ значень (точок) надлишкового тиску P^H на вході капіляра із діапазону [40; 160] кПа, який є робочим для більшості газодинамічних пристроїв.

Із множини експериментальних даних отримують певну кількість розрахункових значень діаметра. Оскільки усі експериментальні точки містять в собі випадкові похибки вимірювання, то значення розрахункових діаметрів дещо відрізняються одне від одного. Для зменшення розкиду одержаних діаметрів від їх математичного сподівання треба забезпечити умову $|P_i^H - P_j^H| \geq 30$ кПа.

За *ефективний* діаметр d_e капілярної трубки приймають усереднене значення отриманих розрахункових значень діаметрів:

$$d_e = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M d_k, \quad (8)$$

де d_k – розрахункове значення діаметра, отримане за парою експериментальних значень витрат Q_i і Q_j , визначених для відповідних значень надлишкових тисків P_i^H і P_j^H на вході капіляра; i, j – порядкові номери експериментальних точок з діапазону [1; n]; M – кількість пар експериментальних точок, взятих для розрахунку.

У зв'язку з тим, що на розраховане за формулами (5)–(7) значення діаметра прохідного каналу капіляра безпосередньо впливають похибки визначення в'язкості, вимірювання довжини каналу, витрат і тисків, необхідно оцінити граничну похибку δ_d^{zp} визначення діаметра капіляра.

Оцінювання похибки δ_d^{zp} здійснене з використанням основних положень теорії похибок вимірювань [16], згідно з якими

$$\delta_d^{zp} = |K_\mu| \cdot \delta_\mu + |K_l| \cdot \delta_l + |K_{Q_i}| \cdot \delta_{Q_i} + |K_{Q_j}| \cdot \delta_{Q_j} + |K_{P_i^H}| \cdot \delta_{P_i^H} + |K_{P_j^H}| \cdot \delta_{P_j^H} + |K_{P_w}| \cdot \delta_{P_w}, \quad (9)$$

де δ_μ , δ_l , δ_{Q_i} , δ_{Q_j} , $\delta_{P_i^H}$, $\delta_{P_j^H}$, δ_{P_w} – граничні відносні похибки відповідно в'язкості, довжини прохідного каналу, об'ємних витрат, надлишкових тисків на вході та абсолютного тиску на виході капіляра; K_μ , K_l , K_{Q_i} , K_{Q_j} , $K_{P_i^H}$, $K_{P_j^H}$, K_{P_w} – коефіцієнти впливу, які можна знайти з виразів:

$$\left. \begin{aligned} K_\mu &= \frac{\partial d}{\partial \mu} \cdot \frac{\mu}{d} = 0,25; \quad K_l = \frac{\partial d}{\partial l} \cdot \frac{l}{d} = 0,25; \quad K_{P_w} = \frac{\partial d}{\partial P_w} \cdot \frac{P_w}{d} = \frac{1}{4(\alpha-1)} \cdot \frac{q \cdot \beta_j - 1}{1 + 2\beta_w^{0,5}}; \\ K_{Q_i} &= \frac{\partial d}{\partial Q_i} \cdot \frac{Q_i}{d} = \frac{\alpha - 2q^{0,5} + 1}{4(\alpha-1) \cdot (q^{0,5} - 1)}; \quad K_{Q_j} = \frac{\partial d}{\partial Q_j} \cdot \frac{Q_j}{d} = \frac{\alpha - 2\alpha \cdot q^{-0,5} + 1}{4(\alpha-1) \cdot (1 - q^{-0,5})}; \\ K_{P_i^H} &= \frac{\partial d}{\partial P_i^H} \cdot \frac{P_i^H}{d} = \frac{1 - (\beta_w^{-0,5} + 2)^{-1}}{2(\alpha-1)}; \quad K_{P_j^H} = \frac{\partial d}{\partial P_j^H} \cdot \frac{P_j^H}{d} = \frac{q \cdot \beta_j^{0,5} \cdot (\beta_w^{-0,5} + 2)^{-1} - \alpha}{2(\alpha-1)}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

де $\alpha = Q_i^2 \cdot P_j^H \cdot (P_j^H + 2P_w) \cdot [Q_j^2 \cdot P_i^H \cdot (P_i^H + 2P_w)]^{-1}$; $\beta_w = (P_w/P_j^H)^2$; $\beta_j = (P_j^H/P_i^H)^2$; $q = (Q_i/Q_j)^2$.

Оскільки під час виконання експериментальних досліджень вимірювання надлишкового тиску на вході капілярної трубки виконують одним і тим самим вимірювальним засобом (манометром) як для P_i^H , так і для P_j^H , то при цьому існує компенсація систематичної похибки δ^c на відміну від випадкової δ^6 складової похибки δ . Вищесказане стосується і вимірювання витрати через капілярний елемент. З врахуванням цього вираз для обчислення граничної похибки δ_d^{zp} можна подати у вигляді

$$\delta_d^{zp} = K_1^Q \cdot \delta_{Q_i}^c + K_2^Q \cdot \delta_{Q_j}^c + K_1^{P^H} \cdot \delta_{P_i^H}^c + K_2^{P^H} \cdot \delta_{P_j^H}^c + |K_\mu| \cdot \delta_\mu + |K_l| \cdot \delta_l + |K_{P_w}| \cdot \delta_{P_w}, \quad (11)$$

де $K_1^Q = |K_{Q_i} + K_{Q_j}|$; $K_2^Q = |K_{Q_i}| + |K_{Q_j}|$; $K_1^{P^H} = |K_{P_i^H} + K_{P_j^H}|$; $K_2^{P^H} = |K_{P_i^H}| + |K_{P_j^H}|$.

Оскільки коефіцієнти впливу K_{Q_i} і K_{Q_j} при похибках витрат і $K_{P_i^H}$ і $K_{P_j^H}$ при похибках тисків мають різні знаки, то запис коефіцієнтів K_1^Q і $K_1^{P^H}$ як модуль їх алгебраїчної суми свідчить про компенсацію відповідних систематичних похибок.

Приклад оцінки похибки визначення діаметра. У таблиці наведені значення складових граничної похибки визначення ефективного діаметра під час дослідження капіляра з довжиною прохідного каналу $l=100$ мм (номінальний діаметр $d=0,1$ мм) і параметрами газового потоку (азот за $T=293$ °С) для пари заданих значень надлишкового тиску ($P_i^H=90$ кПа і $P_j^H=130$ кПа) на вході капілярної трубки і виміряних при цьому значень об'ємних витрат ($Q_i=0,649$ л/год; $Q_j=1,059$ л/год) через неї за абсолютного тиску $P_w=100$ кПа на виході. Значення коефіцієнтів обчислені за формулами (10), а похибки відповідають вищевказаним.

На основі виконаних досліджень прийняте таке співвідношення між випадковою δ^6 і систематичною δ^c складовою відносних похибок δ вимірювання малих витрат (до 5 л/год) плівковим витратоміром і невисоких надлишкових тисків (до 160 кПа) зразковим пружинним манометром: $\delta^c = \delta/4$, де $\delta = \delta^c + \delta^6$. Значення відносних похибок величин, які входять у (5)–(7), під час виконання експериментальних досліджень відповідно становлять: $\delta_\mu=1$ % (у вітчизняних довідниках [6, 8]), $\delta_l=0,02$ %, $\delta_{Q_i}=\delta_{Q_j}=0,2$ %, $\delta_{P_i^H}=\delta_{P_j^H}=0,16$ %, $\delta_{P_w}=0,2$ %.

Коефіцієнти і значення складових граничної похибки визначення ефективного діаметра капіляра

l		μ		Q_i		Q_j		P_i^H		P_j^H		P_w	
K_l	$ K_l \cdot \delta_l, \%$	K_μ	$ K_\mu \cdot \delta_\mu, \%$	K_{Q_i}	$ K_{Q_i} \cdot \delta_{Q_i}, \%$	K_{Q_j}	$ K_{Q_j} \cdot \delta_{Q_j}, \%$	$K_{P_i^H}$	$ K_{P_i^H} \cdot \delta_{P_i^H}, \%$	$K_{P_j^H}$	$ K_{P_j^H} \cdot \delta_{P_j^H}, \%$	K_{P_w}	$ K_{P_w} \cdot \delta_{P_w}, \%$
0,25	0,005	0,25	0,25	0,663	0,133	-0,413	0,083	-0,858	0,137	0,564	0,090	0,044	0,009

Як бачимо з таблиці, найбільше на загальну похибку визначення діаметра прохідного каналу впливає похибка від в'язкості, а тому для підвищення точності необхідне використання сучасних експериментальних даних з похибкою на рівні кількох десятих відсотка [17].

Значення граничної похибки, розрахованої згідно із залежністю (9), становить $\delta_d^{zp} = 0,71 \%$. Якщо врахувати те, що існує часткова компенсація систематичних похибок під час вимірювання тисків і витрат, то розраховане за (11) значення граничної похибки зменшиться і відповідно становитиме $\delta_d^{zp} = 0,62 \%$.

Висновки. Важливою перевагою методу є виключення коефіцієнта m , який враховує особливості дозування капіляром різних газів і неточність задання якого впливає на результат визначення діаметра прохідного каналу капіляра з формули (1). Позитивною особливістю методу є також те, що тут існує компенсація основних складових похибок – тисків і витрат.

Запропонований метод на відміну від відомих забезпечує визначення саме ефективного діаметра (за формулою(8)) прохідного каналу капіляра для робочих умов газодинамічних пристроїв, а тим самим і їх адекватне моделювання. Гранична відносна похибка визначення діаметра для різних капілярів, газів і умов експерименту є на рівні 1,0 %, хоча фактична похибка визначення діаметра часто є значно меншою за рахунок компенсації похибок.

У разі застосування для розрахунку ефективного діаметра експериментальних даних в'язкості з похибкою кількох десятих відсотка гранична похибка визначення діаметра буде на рівні 0,5 %.

1. Gary O. Nelson. *Gas mixtures: preparation and control*. Lewis Publishers, 1992. – 294 p.
2. Ділай І.В., Теплюх З.М. *Задавач-стабізатор витрати газу-носія для хроматографа* // Вісник НУ "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія довілля. Автоматизація". – Львів, 2006. – №561. – С.67–70.
3. Ділай І.В., Теплюх З.М. *Дросельні синтезатори газових сумішей заданого складу* // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2008. – № 3 – С.165–171.
4. Друль Я.Г., Теплюх З.М., Ділай І.В. *Подільники тиску: моделювання і можливості застосування* // Праці Луганського відділення Міжнародної академії інформатизації. – Луганськ, 2009. – №19. – С.51–54.
5. Теплюх З.М. *Принципи побудови високоточних дросельних синтезаторів газових сумішей* // Вісник НУ "Львівська політехніка" "Автоматика, вимірювання та керування". – 2006. – №551. – С.87–94.
6. Голубев І.Ф., Гнездилов І.Е. *Вязкость газовых смесей*. – М.: Изд-во Госкомстандартов, 1971. – 327 с.
7. Маляров Г.А. *Выбор и калибрование капилляров для абсолютного вискозиметра* // Исследование в области механических измерений: Труды ВНИИМ. – Вып. 37(97). – М.–Л.: Стандартгиз, 1959. – С.112–123.
8. Голубев І.Ф. *Вязкость газов и газовых смесей: Справочное руководство*. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1959. – 375 с.
9. Агейкин Д.И. *Датчики систем автоматического контроля и регулирования: Справочные материалы*. – М.: Машигиз, 1959. – 579 с.
10. Коган І.Ш., Шишкин Г.П. *Точное измерение диаметров капиллярных отверстий* // Измерительная техника. – 1985. – № 11. – С. 9–10.
11. Двинин Н.Г., Коган І.Ш., Шишкин Г.П. *Автоматизация контроля и сортировки капилляров* // Тез. докл. X Междунар. конференции "Яблонна-86": Пневматические и гидравлические устройства и системы управления. – М., 1986. С.84-87.
12. Коган І.Ш. и др. *Пневматические устройства для точного измерения внутреннего диаметра круглых капилляров: Тезисы докладов XIV Всесоюзного совещания "Пневмоавтоматика"*. – Новочеркасск, 1982. – С.122–124.
13. Муравьев Б.И., Миронов Р.П. *Пневматическое устройство для контроля малых отверстий* // Измерительная техника. – 1974. – № 3. – С.94.
14. Маляров Г.А. *Определение вязкости воды при температуре 20 °С* // Исследование в области механических измерений: Труды ВНИИМ. – М.–Л.: Стандартгиз, 1959. – Вып. 37(97). – С.125–140.
15. Пис-

тун Е.П., Стасюк И.Д., Теплюх З.Н. Определение расходных характеристик дроссельных элементов. – Научно-техн. реферат сб.: "Автоматизация и контрольно-измерительные приборы в нефтеперераб. м нефтехим. пром-ти". – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1982. – №4. – С. 28–30. 16. Обозовський С.С. Теоретичні основи інформаційно-вимірювальної техніки (Загальні питання і теорія похибок). – К.: НМК ВО, 1991. – 222 с. 17. Schley P., Jaeschke M., Küchenmeister C. and Vogel E. Viscosity Measurements and Predictions for Natural Gas International journal of Thermophysics. – Vol. 25. – No. 6. – November 2004. – P. 1623–1652.

УДК 681.121

О.З. Парнета, З.М. Теплюх

Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра автоматизації теплових та хімічних процесів

ВПЛИВ ПОВЕРХНІ МІРНОЇ ТРУБКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛІВКОВОГО ВИТРАТОМІРА

© Парнета О.З., Теплюх З.М., 2010

Досліджено вплив властивостей внутрішньої поверхні мірної трубки плівкового витратоміра на експлуатаційні характеристики приладу.

In the article the influence of properties of measuring tube inner surface of film flowmeter on the device operating characteristics is investigated.

Висвітлення проблеми. Плівковий витратомір – найуживаніший прилад для вимірювання малих витрат газів, який придатний також для метрологічного забезпечення інших типів витратомірів [1, 2].

Аналіз відомих досліджень [3–5] показує, що для забезпечення високих метрологічних та експлуатаційних характеристик плівкового витратоміра в процесі вимірювання витрати газу на внутрішній поверхні мірної трубки повинен існувати стійкий шар плівкоутворювальної рідини. Товщина цього шару залежить від виду плівкоутворювача, тривалості циклу вимірювань, періоду між вимірюваннями, а також стану внутрішньої поверхні мірної трубки витратоміра [6–8]. Крім того, рідинна плівка може мати неоднакову товщину по висоті мірної трубки внаслідок стікання рідини під дією сил гравітації, випаровування і старіння плівкоутворювальної рідини. Інтенсивність стікання залежить від поверхневих сил взаємодії плівкоутворювальної рідини і стінок мірної трубки, а також густини та в'язкості плівкоутворювальної рідини. Випаровування шару плівкоутворювальної рідини може бути також доволі інтенсивним, коли її основою є рідина з низькою температурою кипіння, наприклад вода, а газ є сухим. Непостійність форми і геометричних розмірів шару плівкоутворювальної рідини на поверхні мірної трубки може істотно впливати на експлуатаційні характеристики приладу (руйнування плівки, малий період між вимірюваннями), а також на точність вимірювання витрати (похибка від налипання плівкоутворювача на стінках трубки може сягати 10 %). Тому дослідження шару плівкоутворювача всередині мірної трубки є важливим та актуальним.

Мета роботи – дослідити вплив властивостей поверхні мірної трубки на експлуатаційні характеристики плівкового витратоміра.

Умови існування плівки рідини на поверхні мірної трубки. Стан рідинної плівки всередині мірної трубки залежить від змочуваності поверхні трубки, що визначається взаємодією