

**Висновки.** Лічильник з використанням мікроконтролера AVR можна застосовувати для обліку витрат холодної та гарячої води в промислових, господарських та інших умовах. Первинними перетворювачами доцільно застосувати тахометричний давач витрат рідини із крильчаткою і терморезистивний давач температури. Лічильник також може бути під'єднаний до будь-якого пристрою, що підтримує стандартний послідовний інтерфейс I<sup>2</sup>C. У цій роботі розроблені алгоритми, які можна реалізувати як на Асемблері, так і на високорівневій мові програмування, зважаючи на те, що архітектура мікроконтролерів AVR оптимізована саме під C++. Робоча програма, яка задовольняє ці алгоритми, може бути розміщена в пам'яті об'ємом 8 кбайт. Програма дає змогу підраховувати з реєстрацією параметрів щосекундно.

1. *Наладка средств измерения и систем технологического контроля / А.С. Ключев, Л.М. Пин, Е.И. Коломиец, С.А. Ключев. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.* 2. *Паспорт ПДЕК 407223.002ПС Счетчики холодной и горячей воды СХВ, СГВ.* 3. *Одноплатные микроконтроллеры. Проектирование и применение / В.А. Швеиц, В.В. Шестакова, Н.В. Бурцева, Т.В. Мелешко. – К.: МК-Пресс, 2005. – 304 с.* 4. *Трамперт В. AVR-RISC микроконтроллеры: Пер. с нем. – К.: МК-Пресс, 2006. – 464 с.* 5. <http://www.atmel.com/documents/ATmega8.pdf>. 6. <http://www.hitachi.com/recourses/HD44780.pdf>

УДК 681.121

**О.З. Парнета, З.М. Теплох**

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

## **ВПЛИВ ТРАНСФУЗІЇ ГАЗІВ НА ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ПЛІВКОВИМ ВИТРАТОМІРОМ**

*О Парнета О.З., Теплох З.М., 2008*

**Досліджено вплив трансфузії газів через рухоми плівку на точність вимірювання малих витрат газів плівковим методом та запропоновано способи його зменшення.**

**In this article the influence of gas diffusion across the film for the accuracy of film flowmeter is investigated and the possibilities of its decreasing are offered.**

**Вступ.** Плівковий витратомір – один з найпоширеніших приладів для вимірювання малих витрат газів, придатний також для метрологічного забезпечення промислових витратомірів та градування лічильників газу. Похибка вимірювання витрати плівковим витратоміром залежить від його виконання, якості градування, а також властивостей досліджуваного газу та плівкоутворюючої рідини [1,2].

**Постановка задачі.** Під час вимірювання витрати різних газів (не повітря), наприклад Н<sub>2</sub>, СО<sub>2</sub>, СН<sub>4</sub>, і відкритому в атмосферу виході мірної трубки витратоміра доза газу під плівкою може деформуватися внаслідок трансфузії газів через рухоми плівку [3]. Причиною цього процесу є різниця парціальних тисків газів з обох боків плівки: парціальні тиски компонентів повітря над плівкою вищі, ніж під плівкою, а парціальний тиск досліджуваного газу (чистого або його компонентів) над плівкою є нижчий. Вплив трансфузії газів через плівку на точність вимірювання є майже не досліджений, тому **метою цієї роботи** є оцінювання величини похибки вимірювання, зумовленої трансфузією газів через рухоми плівку та розроблення рекомендацій щодо її зменшення.

**Основні положення.** Перетікання газу через двосторонню рідинну плівку в напрямі меншого парціального тиску складається з трьох стадій: розчинення газу у поверхневому шарі плівки з боку більшого парціального тиску, дифузії через шар рідини плівки та виділення (десорбції) газу з протилежного боку плівки [4]. Дифузійне переміщення газу в шарі рідини може бути зумовлене різними рушійними силами. При різній концентрації газу в рідині з протилежних боків плівки виникає молекулярна дифузія. Крім того, газ, розчинений в рідині, може переміщатися разом з нею. Таке переміщення газу є конвективною дифузією. Проте товщина рідинних плівок, як правило, не перевищує 10 мкм, тому вплив конвективної дифузії на переміщення газу є незначний і для розрахунку дифузії достатньо використати рівняння дифузії Фіка.

Згідно з першим законом Фіка для одномірного потоку газу його кількість  $dm$ , яка переноситься через площу  $A$  поперечного перерізу за час  $dt$ , є пропорційною до градієнта  $dC/dh$  концентрації  $C$  газу по товщині  $h$  плівки

$$\frac{dm}{dt} = -D A \frac{dC}{dh}, \quad (1)$$

де  $D$  – коефіцієнт молекулярної дифузії.

Для умов стаціонарної дифузії можна записати

$$\frac{dC}{dh} = \frac{\Delta C}{h}, \quad (2)$$

де  $\Delta C$  – різниця концентрацій дифундуючого газу в приповерхневих шарах плівки.

У стані рівноваги згідно з законом Генрі концентрація газу (чистого або його компонентів) в приповерхневому шарі рідини дорівнює

$$C = \beta p, \quad (3)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт розчинності газу;  $p$  – парціальний тиск газу біля поверхні плівки.

Отже, витрата газу, що дифундує через плоску рідинну плівку описується рівнянням

$$\frac{dm}{dt} = -D A \beta \frac{\Delta p}{h}, \quad (4)$$

де  $\Delta p$  – різниця парціальних тисків газу в середовищах, розділених плівкою.

За невеликого тиску газу в типових рідинах розчиняються слабо [5]. За деякими винятками (наприклад, для водню) розчинність будь-якого газу в типових розчинниках зменшується у разі підвищення температури. Значення розчинності  $\beta$  деяких поширених газів у воді при  $20^\circ\text{C}$  і атмосферному тиску наведено в табл. 1 [6].

Таблиця 1

Газ	$N_2$	$O_2$	$H_2$	$CO_2$	$CH_4$	$Ar$	$He$
$\beta$ , м <sup>3</sup> газу/м <sup>3</sup> води	0,016	0,031	0,0182	0,878	0,0331	0,0336	0,0088

**Аналіз методів визначення коефіцієнтів дифузії.** Коефіцієнт дифузії  $D$  є константою пропорційності між витратою газу, що дифундує через плоску рідинну плівку, та рушійною силою дифузії (наприклад, градієнтом концентрації) [5].

Для визначення коефіцієнтів дифузії у воді використовують кореляцію Гайдука-Лоді:

$$D_{AW} = 13,26 \cdot 10^{-5} \cdot h_w^{-1,14} \cdot V_A^{-0,589}, \quad (5)$$

де  $D_{AW}$  – коефіцієнт дифузії газу  $A$  під час розчинення у воді (індекс  $w$ ), см<sup>2</sup>/с;  $\eta_w$  – в'язкість води, сП;  $V_A$  – мольний об'єм газу, см<sup>3</sup>/моль.

В'язкість води за різних температур можна визначити за формулою [5]

$$\lg h_w = A' + \frac{B'}{T - T'}, \quad (6)$$

де  $T$  – температура, К;  $A'$ ,  $B'$ ,  $T'$  – коефіцієнти ( $A' = -1,5668$ ;  $B' = 230,298$ ;  $T' = 146,797$ ).

Середня похибка розрахунку коефіцієнтів дифузії за допомогою кореляції Гайдука-Лоді становить 5,9 %.

Широко використовується кореляція для  $D_{AW}$  – метод Вільке-Ченга [7]:

$$D_{AW} = 7,4 \cdot 10^{-8} \frac{(X M)^{0,5} T}{h_W V_A^{0,6}}, \quad (7)$$

де  $D_{AW}$  – коефіцієнт дифузії під час розчинення у воді,  $\text{см}^2/\text{с}$ ;  $X$  – параметр асоціації розчинника;  $M$  – молекулярна маса розчинника;  $T$  – температура,  $K$ . Вільке-Ченг рекомендують приймати значення параметра асоціації води  $X = 2,6$ . Середня похибка визначення коефіцієнтів дифузії за допомогою методу Вільке-Ченга становила приблизно 10 %.

Експериментально швидкість дифузійного перетікання газу можна визначати за швидкістю переміщення рідинної плівки, яка утворена в циліндричній трубці і розділяє середовища, заповнені різними газами (наприклад, диоксидом вуглецю і азотом або повітрям) за однакового тиску [4]. Під час дифузійного перетікання внаслідок різних розчинностей газів і швидкостей дифузії виникає перепад тисків і плівка починає переміщатися по трубці, що призводить до вирівнювання тисків газів. Якщо коефіцієнт розчинності одного з газів є набагато більший  $\beta_1 \gg \beta_2$ , швидкість переміщення плівки визначається в основному швидкістю дифузії найбільш розчинного газу.

У табл. 2 наведено значення коефіцієнтів дифузії деяких поширених газів у воді, визначені розрахунково за допомогою кореляцій Гайдука-Лоді та Вільке-Ченга, а також деякі значення  $D_{AW}$ , отримані експериментально.

Таблиця 2

Газ	$t, ^\circ C$	$D_{AW}, \text{см}^2/\text{с}$		
		Кореляція Гайдука-Лоді	Метод Вільке-Ченга	Експериментальні значення
$N_2$	18	$1,61 \cdot 10^{-5}$	$1,74 \cdot 10^{-5}$	
	20	$1,71 \cdot 10^{-5}$	$1,85 \cdot 10^{-5}$	
	25	$1,96 \cdot 10^{-5}$	$2,12 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$ [7]
	29,6	$2,21 \cdot 10^{-5}$	$2,38 \cdot 10^{-5}$	
$O_2$	18	$1,81 \cdot 10^{-5}$	$1,96 \cdot 10^{-5}$	
	20	$1,92 \cdot 10^{-5}$	$2,08 \cdot 10^{-5}$	
	25	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$2,38 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$ [7]; $2,41 \cdot 10^{-5}$ [5]
	29,6	$2,48 \cdot 10^{-5}$	$2,68 \cdot 10^{-5}$	
$H_2$	18	$2,56 \cdot 10^{-5}$	$2,79 \cdot 10^{-5}$	
	20	$2,71 \cdot 10^{-5}$	$2,95 \cdot 10^{-5}$	
	25	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$3,38 \cdot 10^{-5}$	$5,85 \cdot 10^{-5}$ [7]; $4,8 \cdot 10^{-5}$ [5]
$CO_2$	18	$1,53 \cdot 10^{-5}$	$1,66 \cdot 10^{-5}$	
	20	$1,63 \cdot 10^{-5}$	$1,75 \cdot 10^{-5}$	
	25	$1,86 \cdot 10^{-5}$	$2,01 \cdot 10^{-5}$	$1,96 \cdot 10^{-5}$ [7]
$CH_4$	18	$1,44 \cdot 10^{-5}$	$1,56 \cdot 10^{-5}$	
	20	$1,53 \cdot 10^{-5}$	$1,65 \cdot 10^{-5}$	$1,49 \cdot 10^{-5}$ [5]
	25	$1,75 \cdot 10^{-5}$	$1,89 \cdot 10^{-5}$	
$Ar$	18	$1,78 \cdot 10^{-5}$	$1,93 \cdot 10^{-5}$	
	20	$1,89 \cdot 10^{-5}$	$2,04 \cdot 10^{-5}$	
	25	$2,17 \cdot 10^{-5}$	$2,35 \cdot 10^{-5}$	
$He$	18	$2,11 \cdot 10^{-5}$	$2,29 \cdot 10^{-5}$	
	20	$2,23 \cdot 10^{-5}$	$2,43 \cdot 10^{-5}$	
	25	$2,56 \cdot 10^{-5}$	$2,78 \cdot 10^{-5}$	

Отже, як зрозуміло з таблиці, значення коефіцієнтів дифузії газів у воді, визначені за допомогою різних методів, є близькими між собою, тому їх можна використати для оцінювання впливу трансфузії газів на точність вимірювання плівкового витратоміра.

**Оцінювання похибки вимірювання витрати плівковим витратоміром, зумовленої дифузією газу через рухому плівку.** Оцінювання вказаної похибки покажемо на прикладі вимірювання витрати водню  $H_2$  за допомогою плівкового витратоміра. Парціальні тиски компонентів повітря (азоту  $N_2$  та кисню  $O_2$ ) над плівкою вищі, ніж під плівкою, а парціальний тиск легкого газу  $H_2$  над плівкою є нижчий. Тому під час вимірювання витрати водень  $H_2$  дифундує через рухому плівку в мірній трубці згори, а азот  $N_2$  та кисень  $O_2$  – донизу. Витрату  $q_{H_2}$  водню, що дифундує в мірній трубці витратоміра, можна визначити за формулою (4). Витрати  $q_{N_2}$ ,  $q_{O_2}$  азоту та кисню, що дифундують з повітря, також можна визначити за формулою (4).

Дані для розрахунку:

- площа плівки:  $A = \pi \cdot d^2/4$  ( $d$  – діаметр мірної трубки);
- товщина плівки:  $h = 10^{-5}$  м;
- коефіцієнти дифузії  $H_2, N_2$  та  $O_2$  у воді при  $20^\circ\text{C}$  –  $D_{H_2 w}$ ,  $D_{N_2 w}$ ,  $D_{O_2 w}$  (табл.1);
- розчинність  $H_2, N_2$  та  $O_2$  у воді при  $20^\circ\text{C}$  –  $\beta_{H_2}$ ,  $\beta_{N_2}$ ,  $\beta_{O_2}$  (табл.2);
- молекулярна маса:  $M_{H_2} = 2$  г/моль;  $M_{N_2} = 28$  г/моль;  $M_{O_2} = 32$  г/моль;
- густина:  $\rho_{H_2} = 0,09$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{N_2} = 1,25$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{O_2} = 1,43$  кг/м<sup>3</sup>;
- тривалість дифузії (час вимірювання витрати):  $\tau = 300$  с.

Кількість  $V$  газу, що дифундує через плівку в мірній трубці плівкового витратоміра за час  $\tau$  вимірювання витрати :

$$V = V_{H_2} - (V_{N_2} + V_{O_2}); V_{H_2} = q_{H_2} \cdot t ; V_{N_2} = q_{N_2} \cdot t ; V_{O_2} = q_{O_2} \cdot t .$$

Похибка вимірювання витрати газу плівковим методом внаслідок дифузії газу через плівку:

$$d_{\text{диф}} = \frac{V}{V_{\text{м.тр.}}} \cdot 100 \% ,$$

де  $V_{\text{м.тр.}}$  – калібрований об'єм мірної трубки плівкового витратоміра.

Результати оцінки впливу дифузії газу  $H_2$  для різних мірних трубок під час вимірювання витрати плівковим методом наведено в табл. 3.

Таблиця 3

$d$ , см	$V_{\text{бор}}$ , мл	$H_2$		$CH_4$		$N_2$		$O_2$		$He$		$Ar$	
		$V$ , мл	$\delta_{\text{диф}}$ , %	$V$ , мл	$\delta_{\text{диф}}$ , %	$V$ , мл	$\delta_{\text{диф}}$ , %	$V$ , мл	$\delta_{\text{диф}}$ , %	$V$ , мл	$\delta_{\text{диф}}$ , %	$V$ , мл	$\delta_{\text{диф}}$ , %
0,5	2	0,009	0,48	0,01	0,51	-0,005	-0,227	0,016	0,79	-0,01	-0,47	0,018	0,92
0,7	5	0,016	0,32	0,02	0,35	-0,008	-0,15	0,03	0,54	-0,016	-0,32	0,03	0,63
0,8	10	0,02	0,24	0,03	0,26	-0,01	-0,116	0,04	0,41	-0,02	-0,24	0,05	0,47
1,1	25	0,05	0,19	0,05	0,21	-0,02	-0,09	0,08	0,33	-0,05	-0,19	0,09	0,38
1,4	50	0,07	0,14	0,08	0,15	-0,03	-0,066	0,12	0,23	-0,07	-0,14	0,13	0,27
1,8	100	0,12	0,12	0,13	0,13	-0,06	-0,057	0,20	0,20	-0,12	-0,12	0,23	0,23
2,5	200	0,23	0,115	0,25	0,12	-0,11	-0,055	0,39	0,19	-0,23	-0,113	0,45	0,22
2,7	250	0,27	0,11	0,29	0,116	-0,13	-0,05	0,45	0,18	-0,26	-0,106	0,52	0,21
3,6	500	0,48	0,09	0,52	0,104	-0,23	-0,046	0,81	0,16	-0,48	-0,095	0,94	0,19
4,4	1000	0,75	0,08	0,80	0,08	-0,36	-0,036	1,25	0,13	-0,73	-0,07	1,45	0,15
6,0	2000	1,38	0,07	1,49	0,07	-0,66	-0,03	2,32	0,12	-1,36	-0,068	2,69	0,13

Аналогічно було визначено похибки вимірювання витрати внаслідок дифузії газу через рухому плівку для таких чистих газів, як метан  $CH_4$ , азот  $N_2$ , кисень  $O_2$ , гелій  $He$  та аргон  $Ar$ . Результати оцінювання вказаних похибок наведено в табл. 3.

**Висновки.** Як очевидно з таблиці, похибки вимірювання витрати внаслідок трансфузії газів для мірних трубок малих об'ємів можуть сягати до 1 % (наприклад, для аргону). Тому для точних вимірювань процес трансфузії необхідно враховувати та вживати заходів щодо зменшення вказаної похибки. Для зменшення трансфузії газів через плівку під час вимірювання витрати треба запобігати появі різниці парціальних тисків. Найпростіше це зробити загином вниз вихідного кінця мірної трубки витратоміра. Також для зменшення різниці парціальних тисків газів рекомендуємо перед вимірюванням витрати – декілька разів пропустити плівку по трубці витратоміра (особливо – для газів, які за складом істотно відрізняються від повітря).

1. Теплох З.М., Парнета О.З. Високоточний плівковий витратомір // Теплоенергетика. Інженерія докільля. Автоматизація / Вісник Нац. ун-т "Львівська політехніка". – № 506. – 2004. – С. 275–282. 2. Теплох З.М., Парнета О.З. Аналіз похибок плівкового витратоміра газу // Вимірювальна техніка та метрологія. – № 62. – 2003. – С. 114–119. 3. Пат. 4.879.907 США, G 01 F 1/708. Soap film flowmeter / Dwight Patterson (США). – № 14.577; Заявл. 13.02.87; Опубл. 14.11.89. – 7 с. 4. Кругляков П.М., Ексерова Д.Р. Пена и пенные пленки. – М.: Химия, 1990. 5. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: Справочн. пособие. – 3-е изд., – Л.: Химия, 1982. 6. Краткий справочник физико-химических величин / Под ред. А.А. Равделя и А.М. Пономаревой. – Л.: Химия, 1983. 7. Дж. Перри Справочник инженера-химика. – Л.: Химия, Т. 1, 1969.

УДКК 681.2.53.082.3:543.27

І.В. Ділай, З.М. Теплох

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

## ГАЗОДИНАМІЧНИЙ ЗРІВНОВАЖЕНИЙ МІСТ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ДРОСЕЛІВ З РІВНИМИ ОПОРАМИ

Ї Ділай І.В., Теплох З.М., 2008

**Оцінено чутливість газодинамічного зрівноваженого моста до зміни довжини капілярного дроселя, включеного в одне із плечей. Показана можливість оптимізації моста за критерієм мінімуму похибки одержання дроселів з рівними опорами.**

**In the article gas-dynamic balanced bridge sensitivity over change of capillary throttle length, included in one of bridge arm is estimated and possibility of bridge optimization to criterion of error minimum receiving of throttles with equal resistances is considered.**

**Постановка задачі.** У вимірювальній техніці, автоматичі, а також для дозування газів і приготування газових сумішей застосовують різні типи дроселів (капілярна трубка, діафрагма, сопло, сопло-заслінка, конус-діафрагма тощо), газодинамічні опори (ГДО) яких повинні мати точно задані значення [1,2]. Проте сучасні методи і засоби вимірювання не забезпечують достатньої точності визначення ГДО дроселів, тому сьогодні перспективнішим є розроблення диференційних методів і пристроїв, в яких значення ГДО досліджуваних дроселів оцінюється щодо вибраного опорного дроселя.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Найвищу точність підбору дроселів з рівними опорами на одному газі може забезпечити пристрій, побудований на базі зрівноваженої дросельної мостової схеми, де в суміжні плечі включені досліджуваний і опорний дроселі [3, 4]. У роботі [5]