

Ділай І. В.,  
Теплюх З. М.,  
Брилинський Р. Б.

## ДОСЛІДЖЕННЯ КАПІЛЯРНИХ ПОДІЛЬНИКІВ ТИСКУ ДЛЯ СКЛАДНИХ ДРОСЕЛЬНИХ СИСТЕМ

Наведені основні варіанти побудови подільників тиску та їх функціональні залежності і показана можливість використання їх на прикладі систем динамічного приготування газових сумішей. Досліджені властивості подільників, зокрема визначений діапазон коефіцієнтів поділу тисків при дроселюванні різних газів. Показані переваги лінійних подільників для побудови газодинамічних систем синтезу сумішей з мікроконцентраціями компонентів.

**Ключові слова:** капіляр, подільник тиску, коефіцієнт поділу тиску, лінійність зміни тиску, газодинамічний синтезатор.

### 1. Вступ

У різних галузях для побудови газодинамічних систем і пристроїв, зокрема мереж постачання природного газу, нафти і води, засобів газоаналітичної техніки, застосовують складні дросельні схеми, які містять різні з'єднання дросельних елементів [1–4]. Одним із поширених є послідовне з'єднання дроселів, яке застосовують, наприклад в газодинамічних системах приготування газових сумішей, для задання витрат газових потоків і тисків (перепадів тисків) [5]. У таких схемах використовують дроселі різних типів, зокрема з турбулентним (годинникові камені, сопло-заслінка, конус-конус тощо) і ламінарним (скляні та металеві капілярні трубки) характером течії середовища. Проте для побудови газодинамічних засобів найперспективнішими є скляні капілярні трубки з циліндричним прохідним каналом [6, 7]. Такі капіляри мають стабільні витратні характеристики, а при певному співвідношенні довжини і діаметра прохідного каналу забезпечують їх лінійність. Окрім того, завдяки можливості плавного скорочення (підшліфовування) довжини прохідного каналу капіляра можна забезпечувати точне підбирання його газодинамічного опору. Тому дослідження такого з'єднання капілярів є актуальним, особливо в зв'язку з побудовою газодинамічних систем синтезу сумішей з мікроконцентраціями компонентів [3–5], в яких необхідно задання суттєво різних перепадів тисків на дозуючих капілярах.

### 2. Аналіз досліджень і публікацій

Досконале функціонування газодинамічних систем передбачає стабілізацію тисків в каналах газових потоків. Для цього застосовують відповідні засоби підтримання тисків, якість роботи яких визначає характеристики всієї системи, наприклад постійність заданих значень концентрацій компонентів сумішей на виході газодинамічного синтезатора [8]. Як правило, у складних дросельних газодинамічних системах встановлено декілька стабілізаторів, які підтримують різні за значенням тиски. Проте вихідний тиск кожного стабілізатора не є строго постійним внаслідок залежності тиску від витрати,

різного впливу завад, навіть незначних конструктивних відмінностей в окремих екземплярах [9]. Прикладом є газодинамічні засоби, призначені для приготування сумішей, коли зміну концентрації компонентів суміші здійснюють зміною їх витрати, що зумовлює зміну підтримуваного стабілізатором тиску, а отже і відхилення значень концентрації від заданих. Для забезпечення постійної витрати чи співвідношення витрат доцільно задавати і підтримувати тиск засобами, схема яких побудована на основі послідовного з'єднання капілярів — подільника тисків [10]. Такий подільник тиску служить лише для відтворення заданих тисків в інших функціональних газодинамічних схемах і не є газодинамічно зв'язаним з цими функціональними схемами. Застосування подільників тиску відкриває перспективу високоточного стабілізування визначальних параметрів, зокрема в газодинамічних системах синтезу складних сумішей з мікроконцентраціями компонентів.

### 3. Мета та задачі дослідження

Вдосконалення роботи складних дросельних систем потребує поліпшення характеристик усіх їх складових систем і зокрема подільників тиску. Для досягнення цієї мети необхідно дослідити різні варіанти побудови капілярних ПТ і зокрема:

- виявити характер зміни міждросельних тисків і коефіцієнтів поділу;
- визначити діапазони зміни коефіцієнтів поділу (співвідношення перепадів тиску) дво- і багатокапілярних подільників;
- показати доцільність їх використання, зокрема на прикладі систем динамічного приготування газових сумішей.

### 4. Капілярні подільники тиску

Капілярний ПТ — це послідовне з'єднання  $n$  дросельних елементів  $D_i$  (рис. 1, *a*), кожен з яких може бути пакетом  $P_i$  капілярів (рис. 1, *б*), окремим капіляром  $K_j$  (рис. 1, *в*) або їх комбінацією. При цьому пакет  $P_i$  капілярів може бути виконаний і як пакет змінного опору (рис. 1, *г*).

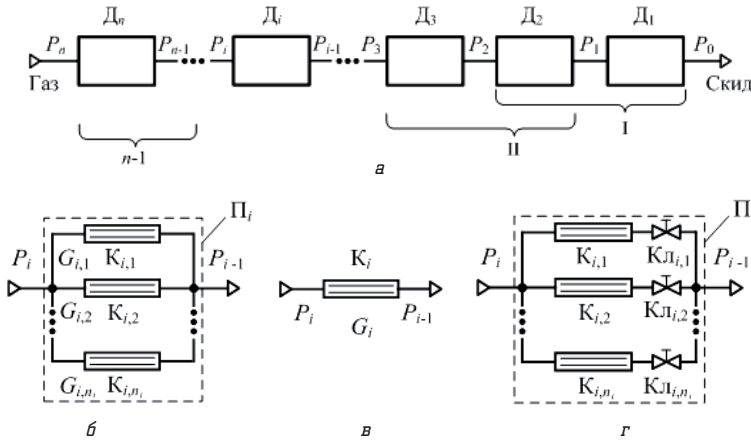


Рис. 1. Капілярний подільник тиску: а — узагальнена схема; б — пакет капілярів; в — окремий капіляр; г — пакет змінного опору

Найперспективніші схеми ПТ розглянуті та досліджені нижче.

При проходженні газу на кожному дросельному елементі ПТ встановлюється певний перепад тиску  $\Delta P_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , а міждросельні тиски утворюють спадну послідовність  $P_n > \dots > P_i > P_{i-1} > \dots > P_0$ .

Основними характеристиками ПТ є коефіцієнти  $k_i$  поділу тисків і характер залежності  $P_i$  від тиску  $P_n$  живлення [10]. Проте зручніше користуватися коефіцієнтом  $\chi_i = k_i^{-1}$ . Його визначають як:

$$\chi_i = (P_n - P_0) / (P_i - P_0) = \Delta P_{n0} / \Delta P_i, \quad (1)$$

де  $\Delta P_{n0} = P_n - P_0$ ,  $\Delta P_i = P_i - P_0$  — відповідно перепад тиску на всьому подільнику і на капілярах від  $i$ -го до 1-го.

У загальному функціональні залежності  $P_i$  ( $P_n$ ), де  $i = 1, \dots, n-1$  є нелінійними, проте при певному співвідношенні конструктивних розмірів капілярів ПТ можна забезпечити їх лінійність, а отже і постійність  $\chi_i$ .

**4.1. Двокапілярний подільник тисків.** Такий ПТ є послідовним з'єднанням двох окремих капілярів  $K_1$  і  $K_2$ . У цьому разі  $\chi_1$  визначають як:

$$\chi_1 = \Delta P_{20} / \Delta P_1 = 1 + \Delta P_2 / \Delta P_1, \quad (2)$$

де  $\Delta P_1 = P_1 - P_0$ ,  $\Delta P_2 = P_2 - P_1$  і  $\Delta P_{20} = P_2 - P_0$  — перепади тиску відповідно на першому, другому капілярах і всьому подільнику.

На рис. 2, а, б наведені графіки зміни перепаду тиску  $\Delta P_1$  на капілярі  $K_1$ , а також  $\chi_1$  від  $\Delta P_{20} \in [1; 100]$  кПа для трьох різних ПТ.

У всіх нижче розглянутих прикладах абсолютний тиск  $P_0$  на виході ПТ — 100 кПа, а  $P_2$  на вході — 200 кПа при температурі  $T$  робочого газу (повітря) 300 К, якщо не зазначене інше  $\Delta P_{20}$ .

Моделюванням встановлено, що в загальному залежності  $\Delta P_1 = f(\Delta P_{20})$  і  $\chi_1 = \phi(\Delta P_{20})$  є нелінійними (рис. 2) і  $\chi_1$  змінюється в широких межах  $\chi_1 \in (1; 300 \cdot 10^3)$ , причому максимального значення  $\chi_{1max}$  досягає для конструкції капілярів ПТ —  $d_1 = d_{max}$ ,  $l_1 = l_{min}$  і  $d_2 = d_{min}$ ,  $l_2 = l_{max}$ , а мінімального — для  $d_1 = d_{min}$ ,  $l_1 = l_{max}$  і  $d_2 = d_{max}$ ,  $l_2 = l_{min}$ .

Розміри капілярів ПТ обмежені конструктивними вимогами і відповідно складають в мм:  $d_{min} = 0,05$ ,  $d_{max} = 0,5$  і  $l_{min} = 5$ ,  $l_{max} = 150$ .

Застосування ПТ з великим значенням коефіцієнта  $\chi$  для відтворення (задання) суттєво різних перепадів тисків в газодинамічних синтезаторах сумішей з мікроконцентраціями компонентів суттєво зменшує кількість дозуючих капілярів змішувача. Так, наприклад, при використанні подільника з  $\chi_1 \approx 0,3 \cdot 10^6$  та дозуючих капілярів з відношенням провідностей 1 : 4 можна на одній стадії досягнути нижньої межі діапазону мікроконцентрацій — 1 ppm. Приготування таких сумішей одностадійними синтезаторами з однаковими  $\Delta P$  на дозуючих капілярах вимагає застосування тисяч капілярів, що є нереальним. Відомі синтезатори, в яких застосовують кількостадійне розчинення, також потребують застосування надто великої кількості капілярів, а крім того, скидання значної кількості проміжних сумішей [11].

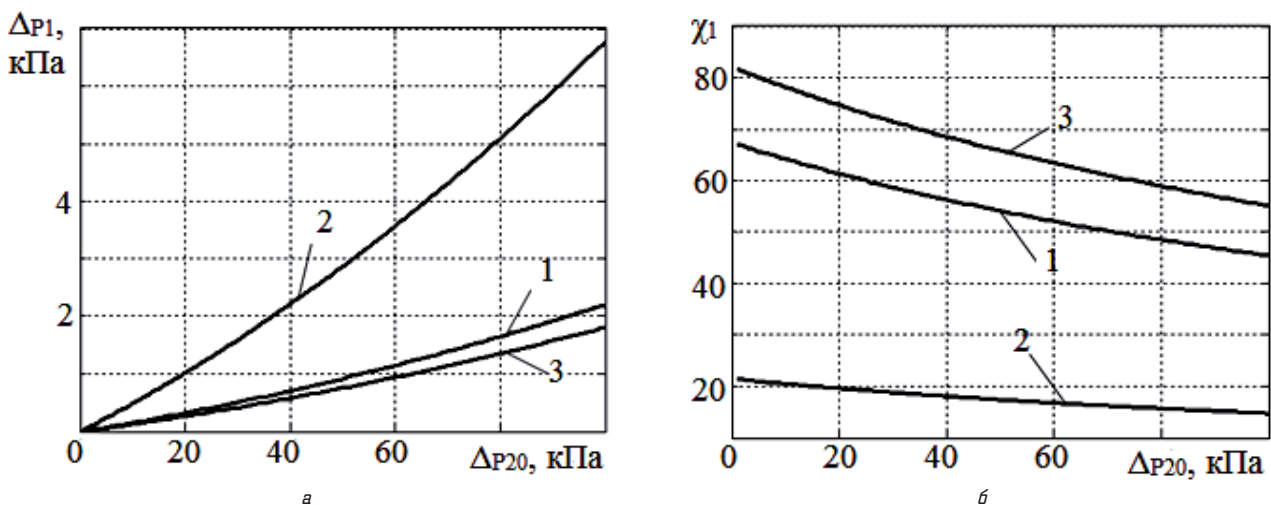


Рис. 2. Графіки основних функціональних залежностей для трьох варіантів подільника: 1 —  $d_1 = 0,12$ ;  $l_1 = 50$ ;  $d_2 = 0,05$ ;  $l_2 = 100$ ; 2 —  $d_1 = 0,11$ ;  $l_1 = 50$ ;  $d_2 = 0,065$ ;  $l_2 = 125$ ; 3 —  $d_1 = 0,15$ ;  $l_1 = 50$ ;  $d_2 = 0,05$ ;  $l_2 = 50$ ; а — залежність перепадів на капілярі 1 від перепаду  $\Delta P_{20}$  на подільнику; б — залежність коефіцієнтів  $\chi_1$  від  $\Delta P_{20}$

Попри свої переваги застосування нелінійних ПТ в синтезаторах має недолік – залежність коефіцієнта  $\chi_1$  від можливих змін тиску  $P_2$  на вході ПТ, що призводить до непропорційного приросту витрат дозованих компонентів сумішей, а відтак і до зміни концентрацій компонентів.

**4.2. Двокапілярний лінійний подільник тиску.** З метою забезпечення постійного значення  $\chi_1$  одержані залежності для побудови лінійного ПТ [10]:

$$\left. \begin{aligned} Y_1 P_0^2 = 1; \quad Y_1 = K_1 X; \quad K_1 = \xi d_1^4 / l_1^2; \\ \delta^4 = \lambda^2 / (1 - 2\lambda); \quad \lambda = l_2 / l_1; \quad \delta = d_2 / d_1; \\ \max \left\{ 16 l_1 \xi^{-1} d_1^{-1} \left[ \sqrt{1 + Y_1 (P_1^2 - P_0^2)} - 1 \right] \right\} \leq 2320; \\ d_{\min} \leq d_i \leq d_{\max}; \quad l_{\min} \leq l_i \leq l_{\max}; \quad i \in \{1, 2\}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де, крім відомих,  $\xi$  – коефіцієнт кінцевих ефектів;  $X$  – параметричний комплекс газу,  $X = (512 R_r T \mu^2)^{-1}$ ;  $R_r$  – газова стала,  $R_r = R/M$ ;  $R$  – універсальна газова стала;  $M$  – молекулярна маса;  $\mu$  – в'язкість дросельованого газу при температурі  $T$ .

Міждросельний тиск  $P_1$  лінійного ПТ визначають згідно із залежністю:

$$P_1 = \lambda(1 - \lambda)^{-1} (P_2 - P_0) + P_0. \quad (4)$$

На основі залежностей (3) і (4) можна визначити конструктивні розміри прохідних каналів капілярів лінійного ПТ, які забезпечують мінімальне значення  $P_1$  (максимум  $\chi_1$ ), тобто:

$$P_1(\lambda) \rightarrow \min; \quad P_1 \in (P_0; P_2). \quad (5)$$

Як впливає з рівняння системи (3), яке зв'язує співвідношення діаметрів  $\delta$  і співвідношення довжин  $\lambda$  капілярів лінійного ПТ, яке належить діапазону  $\lambda \in (0; 0,5)$ , а з врахуванням обмежень на довжину капілярів –  $\lambda \in (\lambda_{\min}; \lambda_{\max})$ , маємо  $\lambda_{\min} = l_{\min}/l_{\max} = 5/150 = 1/30$ ,  $\lambda_{\max} = 0,5$ .

Залежність  $P_1(\lambda)$  є монотонно зростаючою функцією та досягає екстремальних значень на кінцях діапазону.

Оскільки побудову ПТ починають з визначення розмірів капіляра  $K_1$ , то для забезпечення мінімального  $P_1$  спочатку вибирають  $l_1 = l_{\max} = 150$  мм, а з умови лінійності капіляра [10] визначають його діаметр  $d_1 = (\xi X P_0^2)^{-1/4} l_1^{1/2}$ . Якщо  $d_1 > d_{\max}$ , то задають  $d_1 = d_{\max}$  і визначають довжину  $l_1 = (\xi X P_0^2)^{0,5} d_1^2$ , де  $l_1 \in [l_{\min}; l_{\max}]$ . Отже розрахунок передбачає ітераційну зміну значення одного із розмірів капіляра для забезпечення входження іншого розміру в допустимий діапазон значень.

За розмірами ( $d_1, l_1$ ) капіляра  $K_1$  і  $\lambda$  визначають  $d_2, l_2$  капіляра  $K_2$  згідно із  $l_2 = \lambda_{\min} l_1$  і  $d_2 = \delta d_1$ . Якщо одержані значення задовольняють умови  $l_{\min} \leq l_2 \leq l_{\max}$  і  $d_{\min} \leq d_2 \leq d_{\max}$ , то визначають  $P_1$ , яке і є мінімальним. Інакше, якщо  $l_2 < l_{\min}$  вибирають  $l_2 = l_{\min}$ , розраховують  $\lambda$  і відповідно діаметр  $d_2 = \delta d_1$ . Якщо  $d_2 < d_{\min}$ , то приймають  $d_2 = d_{\min}$  і розраховують  $\delta$ . Далі визначають  $\lambda$  з рівняння  $\lambda = \delta^2([\delta^4 + 1]^{1/2} - \delta^2)$  і відповідно  $l_2 = \lambda l_1$ .

У табл. 1 для трьох різних газів наведені розміри капілярів двоелементних лінійних ПТ, які забезпечують мінімум  $P_1$  (максимум  $\chi_1$ ).

Таблиця 1

Параметри лінійних подільників та їх основні характеристики

№	Газ	$d_1$ , мм	$l_1$ , мм	$d_2$ , мм	$l_2$ , мм	$P_{1\min}$ , кПа	$\chi_{1\max}$
1	Повітря	0,334	150,0	0,062	5,0	103,448	29
2	He	0,50	115,94	0,106	5,0	104,507	22,2
3	CO <sub>2</sub>	0,271	150,0	0,050	5,0	103,448	29

Як показали дослідження, значення  $\chi_{1\max}$  для основних газів не перевищує 30 і коефіцієнт  $\chi_1$  є постійним при зміні тиску  $P_2$  живлення подільника. Використання таких подільників в системах задання тисків живлення на дозуючих капілярах синтезатора забезпечує зменшення похибок концентрації компонентів приготовленої суміші, а також можливість зміни витрати суміші без зміни концентрації компонентів.

**4.3. Двокапілярний подільник тисків.** Якщо замість окремих дроселів у двокапілярному ПТ встановити пакети  $\Pi_1$  і  $\Pi_2$  капілярів (рис. 1, з), кількість яких складає  $N_1$  і  $N_2$  відповідно, то ними можна задавати різні тиски  $P_1$  вибірками  $n_1, n_2$  відповідних капілярів за допомогою встановлених на їх виходах електромагнітних клапанів  $K_{1,i}, K_{2,j}$ .

У разі застосування в пакеті капілярів з однаковими розмірами прохідних каналів значення міждросельного тиску можна визначити за залежністю [5]:

$$P_1 = \left[ (\delta_n^4 P_2^2 + P_0^2) / V_n + 2(\lambda_n - 1)(U_n V_n)^{-1} \times \right. \\ \left. \times \left( W_n - \sqrt{W_n^2 + U_n \delta_n^4 (P_2^2 - P_0^2)} \right) \right]^{1/2}, \quad (6)$$

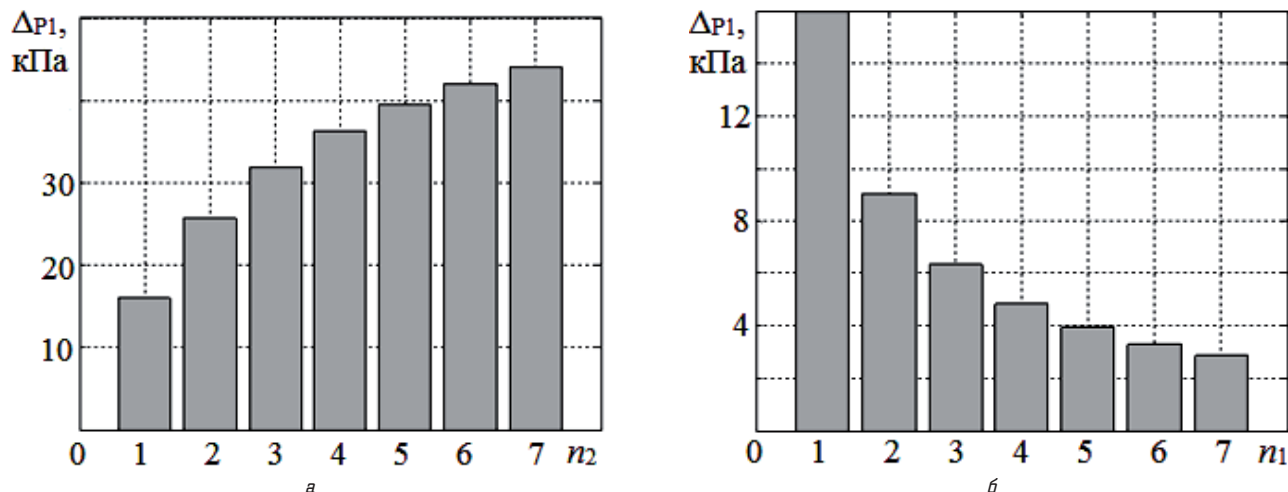
де

$$n_{21} = n_2 / n_1; \quad \lambda_n = n_{21} l_2 / l_1; \quad \delta_n^4 = n_{21}^2 d_2^4 / d_1^4; \\ W_n = \lambda_n + \delta_n^4; \quad V_n = \delta_n^4 + 1; \quad U_n = Y_1 V_n; \quad Y_1 = K_1 X.$$

На рис. 3 показана зміна тиску  $P_1$  для відповідної вибірки у двох пакетах, кожен з яких складається з семи капілярів. Розміри каналів капілярів в мм: пакета  $\Pi_1$  –  $d_1 = 0,14, l_1 = 35$ ;  $\Pi_2$  –  $d_2 = 0,1; l_2 = 32$ .

Отже, застосування подільника з пакетами за рис. 1, з забезпечує відтворення багатьох (залежно від значень  $n_1$  і  $n_2$ ) різних міждросельних тисків, при тім капіляри такого подільника (усі) можуть бути як довільними, так і лінійними (умова (3)), тобто ПТ можуть володіти властивостями, описаними у підрозділах або 4.2, або 4.3. Пакет за рис. 1, б доцільно застосовувати у лінійному подільнику для підвищення коефіцієнта  $\chi$ , тобто зменшення міждросельного тиску.

**4.4. Багатокапілярний подільник.** Якщо в газодинамічних системах виникає потреба задання кількох різних значень тисків, то їх може бути доцільно відтворювати від одного багатокапілярного ПТ (рис. 1, а). Проектування такого ПТ для заданого вектора тисків  $\{P_i\}_{i=0}^n$  полягає у послідовному визначенні із рівності масових витрат  $G_{i+1} = G_i$  одного із розмірів (наприклад,  $d_{i+1}$  або  $l_{i+1}$ ) прохідного каналу капіляра  $K_{i+1}$ , який у парі з іншим



**Рис. 3.** Залежність тиску  $P_1$  у двокаплярному подільнику від кількості капілярів у пакетах: *а* — пакет  $\Pi_1$  містить  $n_1 = 1$  капіляр; пакет  $\Pi_2$  змінного опору,  $n_2 = 1, N_2$ ; *б* — пакет  $\Pi_1$  змінного опору,  $n_1 = 1, N_1$ ; пакет  $\Pi_2$  містить  $n_2 = 1$  капіляр

суміжним капіляром  $K_i$  з відомими розмірами ( $d_i$  і  $l_i$ ) утворює двокаплярний подільник [10]. Послідовність пар капілярів, які залучають до визначення розмірів, позначені на рис. 1, *а* як I, II, ...,  $n - 1$ .

Для визначення міжросельних тисків  $\{P_i\}_{i=1}^{n-1}$  подільника, складеного з  $n$  капілярів відомих розмірів  $\{d_i, l_i\}_{i=1}^n$ , можна використовувати залежність [5]:

$$P_i = \left( Y_i^{-1} \left[ \left[ G_{1n} / A_i + 1 \right]^2 - 1 \right] + P_{i-1}^2 \right)^{1/2}, \quad (7)$$

де

$$G_{1n} = 0,5 a_{1n}^{-1} \left[ -b_{1n} + \sqrt{b_{1n}^2 - 4 a_{1n} c_{1n}} \right];$$

$$a_{1n} = a \sum_{j=1}^n d_j^{-4}; \quad a = \xi (4\pi\mu)^{-2} X^{-1};$$

$$b_{1n} = b \sum_{j=1}^n (l_j d_j^{-4}); \quad b = (2\pi\mu X)^{-1};$$

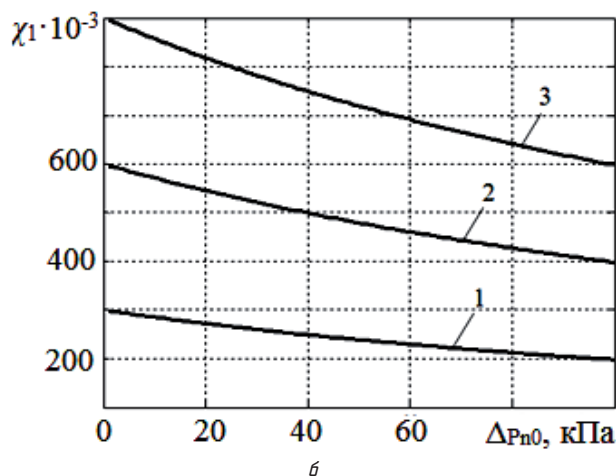
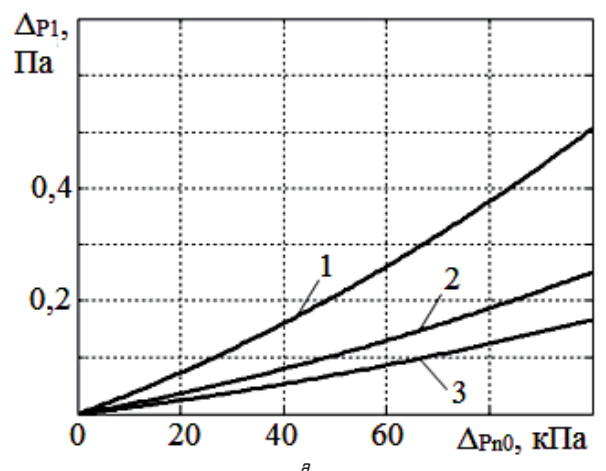
$$c_{1n} = P_0^2 - P_n^2.$$

Як приклад на рис. 4 наведені графіки залежності  $\Delta P_1$  і  $\chi_1$  від перепаду тиску  $\Delta P_{n0} \in [1; 100]$  кПа на кожному з трьох капілярних ПТ, які містять відповідно  $n \in \{2; 3; 4\}$  капіляри. Розміри капіляра  $K_1$  кожного подільника —  $d_1 = d_{\max}$ ,  $l_1 = l_{\min}$ , а інших —  $d_{\min}, l_{\max}$ .

З графіків на рис. 4, *а* видно, що значення перепадів тиску  $\Delta P_1$  на капіляри  $K_1$  усіх трьох варіантів подільників змінюються в межах 1 Па і залежність  $\Delta P_1 = f(\Delta P_{n0})$  є нелінійною.

Нелінійними є також залежності  $\chi_1 = f(\Delta P_{n0})$ , представлені на рис. 4, *б*, а їх значення для вказаних варіантів подільників змінюється в широких межах — до  $900 \cdot 10^3$ .

Отже, як показали дослідження, залежність міжросельних тисків ПТ від зміни їх тиску живлення в загальному за своїм характером є нелінійною, а  $\chi_1$  є непростийним. Якщо всі капіляри багатокapлярного подільника зробити лінійними, то такі ПТ можуть мати властивості аналогічні двокаплярним лінійними подільникам, тобто  $\chi_i = \text{const}$  і  $\Delta P_i = f(\Delta P_{n0})$  є лінійними.



**Рис. 4.** Графіки основних залежностей для трьох варіантів подільників (1 — двокаплярний; 2 — трикаплярний; 3 — чотирьокapлярний): *а* — залежність перепаду  $\Delta P_1$  на капіляри  $K_1$  від перепаду тиску  $\Delta P_{n0}$  на подільнику; *б* — залежність коефіцієнта  $\chi_1$  від зміни  $\Delta P_{n0}$

#### 4.5. Багатокapлярний подільник тисків з пакетом.

Одним із багатьох варіантів побудови багатоелементних подільників з окремими капілярами і пакетами є багатокapлярний ПТ з пакетом на виході.



Необхідну вибірку капілярів пакета здійснюють ввімкненням клапанів Кл, встановлених на їх виходах.

Особливістю такого подільника є те, що вибірка капілярів пакета забезпечує зміну найменшого в подільнику тиску  $P_1$  (зміну мікроконцентрації компонента у синтезаторах газових сумішей), а також однонапрявленість змін усіх міждросельних тисків подільника.

Тиски  $P_i$  багатокапілярного подільника з встановленим на виході пакетом  $\Pi_1$  змінного опору визначають за системою рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} G_{2n} - a_l \sum_{k \in \{1, \dots, N_1\}} \left\{ l_{1,k} \left[ \sqrt{1 + \xi d_{1,k}^4 / l_{1,k}^2 X (P_1^2 - P_0^2)} - 1 \right] \right\} &= 0; \\ P_i = \left( Y_i^{-1} \left[ G / A_i + 1 \right]^2 - 1 \right) + P_{i-1}^2 &^{1/2}; \quad i = \overline{2, n-1}, \end{aligned} \right\} (8)$$

де

$$G_{2n} = 0,5a_{2n}^{-1} \left[ \sqrt{b_{2n}^2 - 4a_{2n}c_{2n} - b_{2n}} \right];$$

$$a_l = 4\pi\mu/\xi; \quad a_{2n} = a \sum_{j=2}^n d_j^{-4}; \quad b_{2n} = b \sum_{j=2}^n (l_j d_j^{-4});$$

$$c_{2n} = P_1^2 - P_n^2.$$

Із першого рівняння системи (8) визначають значення тиску  $P_1$  для відповідної вибірки  $k \in \{1, \dots, N_1\}$  капілярів пакета  $\Pi_1$ , а з другого — решту значень міждросельних тисків ПТ.

### 5. Обговорення результатів дослідження капілярних подільників тисків

Серед виконаних авторами теоретичних і експериментальних досліджень складних дросельних схем важливе місце зайняли системи динамічного приготування газових сумішей. Аналіз одержаних результатів показав, що для підвищення якісних показників роботи (точність задання і підтримання концентрації компонентів сумішей) цих систем необхідно дослідити і оптимізувати окремі їх складові, серед яких подільники тисків і витрат, суматори потоків тощо [5]. Так зокрема, було виявлено, що для одержання мікроконцентрації компонентів при побудові синтезаторів потрібна надто велика кількість капілярів, а також, що внаслідок недосконалості стабілізаторів тисків виникали великі похибки концентрацій синтезованих сумішей. З метою усунення цих недоліків було запропоновано використовувати ПТ для задання і відтворення тисків живлення на дозуючих капілярах синтезатора [10]. При цьому було виявлено, що в залежності від конкретної задачі синтезу такий подільник може складатися з різної кількості капілярів, з'єднаних як послідовно, так і паралельно в пакетах капілярів. Крім того, застосування окремого газодинамічного кола задання тисків, незв'язаного з колами дозування компонентів також сприяє зменшенню похибки підтримання тисків у складних газодинамічних колах. Оскільки такі дослідження виконуються вперше, то виникла необхідність детально дослідити властивості подільників тиску їх переваги і недоліки.

Виконані дослідження ПТ показали, що кожен варіант побудови подільника має і переваги, і недоліки.

Так наприклад, ПТ побудовані з довільними співвідношеннями конструктивних розмірів прохідних каналів можуть мати великий коефіцієнт поділу тисків, проте вони не забезпечують постійності коефіцієнта поділу, внаслідок чого концентрація компонентів синтезованої суміші залежатиме від зміни тисків живлення подільника. В зв'язку із цим були розроблені подільники з лінійною зміною всіх міждросельних тисків при зміні тиску живлення подільника. Застосування ПТ з лінійними характеристиками є особливо доцільним в газодинамічних синтезаторах багатокомпонентних газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів і задавачах витрати. Крім того, пакет капілярів постійного опору в подільниках забезпечує збільшення коефіцієнта поділу тисків, а пакет змінного опору забезпечує пропорційну зміну витрати.

### 6. Висновки

Досліджені основні варіанти побудови подільників тиску та їх функціональні залежності. Показано як в залежності від призначення відповідним вибором варіанта побудови подільника і конструктивних параметрів капілярів можна забезпечити однонаправлену і лінійну зміну всіх міждросельних тисків (постійне співвідношення перепадів тисків на капілярах подільників) при зміні тиску живлення, а також забезпечити суттєво різні перепади тиску на капілярах подільника (широкий діапазон зміни коефіцієнтів поділу).

Виконані дослідження відкривають перспективу ефективного використання виявлених властивостей капілярних подільників у складних газодинамічних системах, зокрема для побудови динамічних систем приготування газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів.

### Література

1. Пістун, Є. П. Автоматизована система побудови математичної моделі газогідродинамічних дросельних схем [Текст] / Є. П. Пістун, Р. Я. Грудецький // Збірник наукових праць «Вісник НТУ «ХПІ». Нові рішення в сучасних технологіях. — 2012. — № 33. — С. 72–77.
2. Хацкевич, Е. А. Контроль качества природных газов хроматографическим методом [Текст] / Е. А. Хацкевич. — СПб.: Б.и., 2000. — 218 с.
3. Рейман, Л. В. Техника микродозирования газов. (Методы и средства для получения газовых смесей) [Текст]: справ. пос. / Л. В. Рейман. — Л.: Химия, 1985. — 224 с.
4. Nelson, G. O. Gas mixtures: preparation and control [Text] / G. O. Nelson. — Lewis Publishers, 1992. — 294 p.
5. Ділай, І. В. Оптимальні дросельні схеми динамічних систем приготування складних газових сумішей [Текст] / І. В. Ділай, З. М. Теплюх, Ю. З. Вашкурак // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2014. — № 4/8(70). — С. 39–45. doi:10.15587/1729-4061.2014.26257.
6. Стасюк, І. Д. Малоінерційні газодинамічні мікровитратоміри газових потоків [Текст] / І. Д. Стасюк // Збірник тез доповідей сьомої всеукраїнської науково-технічної конференції «Вимірювання витрати та кількості газу». — Івано-Франківськ, 2011. — С. 24.
7. Стасюк, І. Д. Застосування скляних капілярних трубок для вимірювання малих витрат і мікровитрат газів [Текст] / І. Д. Стасюк // Методи та прилади контролю якості. — 2001. — № 7. — С. 147–151.
8. Helwig, N. Gas mixing apparatus for automated gas sensor characterization [Text] / N. Helwig, M. Schüler, C. Bur, A. Schütze, T. Sauerwald // Measurement Science and Technology. — 2014. — Vol. 25, № 5. — P. 055903. doi:10.1088/0957-0233/25/5/055903.

9. Стабилизатор абсолютного давления САД-307 [Электронный ресурс]. Режим доступа: \www/URL: <http://www.elsy.kz/files/automatic/4/4-7.pdf>. — 19.09.2014.
10. Ділай, І. В. Побудова подільників тиску для живлення газодинамічних дросельних синтезаторів [Текст] / І. В. Ділай, З. М. Теплох // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Сер. Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація. — 2009. — № 659. — С. 120–128.
11. Теплох, З. М. Принципи побудови високоточних дросельних синтезаторів газових сумішей [Текст] / З. М. Теплох // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Сер. Автоматика, вимірювання та керування. — 2006. — № 551. — С. 87–94.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ КАПИЛЯРНЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ СЛОЖНЫХ ДРОСЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Приведены основные варианты делителей давления, их функциональные зависимости и показана возможность их использования на примере систем динамического приготовления газовых смесей. Исследованы свойства делителей давления, в частности определен диапазон коэффициентов деления давления при дроселировании различных газов. Показаны преимущества линейных делителей давления для построения газодинамических систем синтеза смесей с микроконцентрациями компонентов.

**Ключевые слова:** капилляр, делитель давления, коэффициент деления давления, линейность изменения давления, газодинамический синтезатор.

**Ділай Ігор Володимирович**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів, Національний університет «Львівська політехніка», Україна, e-mail: [divlv@ukr.net](mailto:divlv@ukr.net).

**Теплох Зеновій Миколайович**, доктор технічних наук, професор, кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів, Національний університет «Львівська політехніка», Україна, e-mail: [atxp2010@gmail.com](mailto:atxp2010@gmail.com).

**Брилинський Роман Богданович**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів, Національний університет «Львівська політехніка», Україна, e-mail: [brblv@ukr.net](mailto:brblv@ukr.net).

**Ділай Игорь Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, кафедра автоматизации тепловых и химических процессов, Национальный университет «Львовская политехника», Украина.

**Теплох Зеновий Николаевич**, доктор технических наук, профессор, кафедра автоматизации тепловых и химических процессов, Национальный университет «Львовская политехника», Украина.

**Брылинский Роман Богданович**, кандидат технических наук, доцент, кафедра автоматизации тепловых и химических процессов, Национальный университет «Львовская политехника», Украина.

**Dilay Ihor**, Lviv Polytechnic National University, Ukraine, e-mail: [divlv@ukr.net](mailto:divlv@ukr.net).

**Teplukh Zenoviy**, Lviv Polytechnic National University, Ukraine, e-mail: [atxp2010@gmail.com](mailto:atxp2010@gmail.com).

**Brylins'kyi Roman**, Lviv Polytechnic National University, Ukraine, e-mail: [brblv@ukr.net](mailto:brblv@ukr.net).

УДК 637.338.4:637.181:641.85  
DOI: 10.15587/2312-8372.2014.28100

Обозна М. В.,  
Прасол Д. Ю.

## ВИВЧЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ М'ЯКОГО СИРУ, ВИГОТОВЛЕНОГО ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕТРАДИЦІЙНИХ ІНГРЕДІЄНТІВ

Вдосконалена технологія м'якого сирного продукту основана на використанні сухого знежиреного молока, з частковою його заміною на подрібнений концентрат арахісового ядра та борошно кукурудзяне, з використанням рафінованої, дезодорованої соняшникової олії. Проведено дослідження фізико-хімічних властивостей удосконаленого продукту. Удосконалений продукт дозволить розширити асортимент дешевої сирної продукції.

**Ключові слова:** м'який сирний продукт, сухе знежирене молоко, подрібнений концентрат ядра арахісу, кукурудзяне борошно.

### 1. Introduction

At present the world market of dairy products is the high-competition sector, which dynamically develops. The leading specialists testify that cheese production is the most profitable among dairy products production and it causes considerable interest among producers. Producers of dairy products face with the problem of dairy products assortment expansion which rises in the conditions of the increased competition at the market of rennet cheeses and customer's demand in the high quality products [1].

The risk of milk production reducing, mainly, through the factor of seasonality, results the certain difficulties

in the cheese-making industry especially during winter-spring period.

That is why the dairy products production especially the production of cheeses on the basis of restored and recombined milk is actual task. The stable quality as one of the most important criteria of food stuff competition takes the lead now.

Production of soft cheese products is developing taking into account insignificant labor intensiveness of technology of soft cheeses. They have wide assortment and considerable advantages comparatively with natural rennet cheeses and their high characteristics allow to satisfy requires of wide circle of customers [1, 2].