

ун-ту "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація". – № 617, 2008. – С. 179–183. 8. Ділай І.В., Парнета О.З., Теплох З.М. Розрахунок і оптимізація конструкції мірних трубок плівкових витратомірів // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація". – № 581, 2007 – С. 104–110. 09. А.с.1631285 СССР, G 01 F 1/42. Пленочно-пузырьковый расходмер / Дубовой Н.Д., Илясов А.Ю. (СССР). – № 4627415/10; Заявл.28.12.88; Опубл. 28.02.91, Бюл. № 8. – 4 с. 10. Патент 13107 України, G 01 F 1/70. Плівковий витратомір / А.Ф. Данько, І.С. Ігнашкін. – № 5100024/ SU; Заявл. 08.05.91; Опубл. 28.02.97, Бюл. № 1. – 5 с. 11. 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. 12. Пат. 2 092 742 А Великобританії, G 01 P 5/18. Bubble flowmeter / Peter Small (Великобританія). – № 8104006; Заявл. 10.02.81; Опубл. 18.08.82. – 5 с. 13. Парнета О.З. Плівкоутворююча рідина для мікровитратомірів газів // Науковий Вісник. – Нац. лісотехн. ун-т України. – Випуск 17.4, 2007. – С. 130–133. 14. Теплох З.М., Парнета О.З. Генератори плівок мікровитратомірів газів// Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація". – 2002. – № 460. – С. 78–81.

УДК 681.2:543.27

І.В. Ділай, З.М. Теплох

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

ПОБУДОВА ПОДІЛЬНИКІВ ТИСКУ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ДРОСЕЛЬНИХ СИНТЕЗАТОРІВ

Ї Ділай І.В., Теплох З.М., 2009

Описана система стабілізування тисків живлення газодинамічних синтезаторів, яка побудована на базі лінійного багатоеlementного подільника тиску і яка забезпечує приготування газових сумішей із заданим з високою точністю складом у широкому діапазоні концентрацій компонентів, а також з одночасною можливістю плавної зміни витрати суміші на виході синтезатора. Подані залежності для розрахунку геометричних розмірів прохідних каналів капілярних елементів лінійного подільника.

The system of feeding pressures gas-dynamic synthesizers stabilization constructed on the base of linear multiple-unit pressure divider, which provides the gas mixtures preparation with high precision given composition in wide concentration component range, also with simultaneous possibility of mixture flow rate smooth change on the synthesizer outlet, is described. The dependences for estimating of capillary elements straightway canals geometrical dimensions of linear divider are presented.

Постановка задачі. Газові суміші заданого складу використовують у найрізноманітніших сферах людської діяльності, зокрема, в системах життєзабезпечення, медицині та біотехнологіях (наприклад, для дихання і анестезії), в техніці (серед яких зварювальні, лазерні, освітлювальні, захисні суміші), а також у наукових і метрологічних цілях [1]. Одними з найперспективніших засобів для приготування таких сумішей є газодинамічні дросельні синтезатори (ГДС), побудовані на базі змішування дозованих капілярними елементами газових потоків від джерел чистих компонентів [2]. Похибки концентрацій компонентів сумішей, які готують за допомогою таких ГДС, істотно залежать від точності задання та підтримання тисків на входах і виходах дозуючих

капілярів, тому робота над вдосконаленням системи стабілізації тисків живлення усіх елементів ГДС є актуальною.

Аналіз останніх досліджень та публікацій показує, що для забезпечення постійності концентрацій компонентів суміші на виході ГДС тиски компонентів на дозуючих елементах підтримують постійними за допомогою окремих стабілізаторів [3–5]. Проте значення стабілізованих тисків під час роботи ГДС не залишаються строго постійними, а можуть змінюватися під дією багатьох факторів впливу (витрата газу через стабілізатор, параметри стану газу, час експлуатації тощо) [6]. Такі впливи є різними для різних типів та екземплярів стабілізаторів, а також для різних умов їх роботи, що з очевидністю не забезпечує постійності співвідношення витрат компонентів в ГДС, особливо коли потрібно змінювати концентрації окремих компонентів. Як зрозуміло з роботи [7] вирівнювання тисків на входах дозуючих елементів шляхом їх “закорочення” також не забезпечує високоточного стабілізування тисків для ГДС із можливістю зміни задання концентрацій і витрати суміші. Особливі ускладнення за рівності тисків на входах дозуючих елементів виникають під час побудови ГДС з малими концентраціями (на рівні 0,1 % і менше) окремих компонентів (необхідність великої кількості дроселів для компонентів з великими концентраціями, кількостадійне розчинення, необхідність скидання частини сумішей після окремих стадій) [8].

Метою роботи є розроблення системи стабілізації тисків на базі багатоелементного подільника тиску для розширення можливостей газодинамічних синтезаторів – приготування сумішей заданого складу з малими значеннями концентрацій окремих компонентів та з можливістю плавної зміни в широкому діапазоні витрати синтезованої суміші.

Опис схеми стабілізування тисків синтезатора. Основними елементами запропонованої у цій роботі системи задання стабілізованих тисків живлення ГДС є капіляри K_1, \dots, K_n лінійного подільника із задавачами C_0, C_n тиску на його вході та виході, а також повторювачі P_0, \dots, P_n (див. рис.1). Перевагами такої системи є можливість одночасного задання різних за значенням тисків (перепадів) і можливість одночасної пропорційної їх зміни, а також набагато менша залежність тисків на кінцях дозуючих капілярів від витрати через них окремих компонентів синтезованої суміші.

Завдяки таким особливостям системи для компонентів (наприклад, компонентів N і $N-1$) з макроконцентраціями їх у синтезованій ГДС суміші тиски P_n і P_{n-1} на входах дозуючих капілярів є високими, а для компонентів (наприклад 1 і 2) з мікроконцентраціями їх у суміші відповідні тиски P_1 і P_2 є низькими. Це уможливило застосування прийнятних за розмірами скляних капілярних трубок з розмірами прохідних каналів: $d=0,05\dots0,5$ мм; $l=5\dots150$ мм і уникнення надто великої кількості капілярів у пакетах для компонентів з макроконцентраціями їх у суміші.

Застосування лінійних капілярів як у подільнику, так і в пакетах усіх компонентів забезпечує, по-перше, компенсацію неконтрольованих змін тисків P_0 і P_n від нестабільності застосовуваних пристроїв C_0 і C_n , а по-друге, уможливило зміну в широкому діапазоні витрати синтезованої суміші шляхом зміни задання тиску P_n .

Однотипність засобів регулювання тисків (повторювачі тиску) на кінцях дозуючих капілярів при зміні витрати окремих компонентів (через зміну кількості увімкнених капілярних елементів у пакеті) уможливило компенсацію цієї зміни, внаслідок чого перепад тиску на капілярах змінюється настільки мало, що це практично не впливає на відхилення концентрацій компонентів від заданих.

Розглянемо детальніше приклад такого ГДС, наведений на рис.1.

Синтезатор складається із двох основних частин: змішувача 1 потоків чистих компонентів, дозованих дроселями відповідних пакетів $ПД_1, \dots, ПД_N$ та вузла 2 (власне подільника тиску) стабілізування тисків живлення дозуючих дроселів.

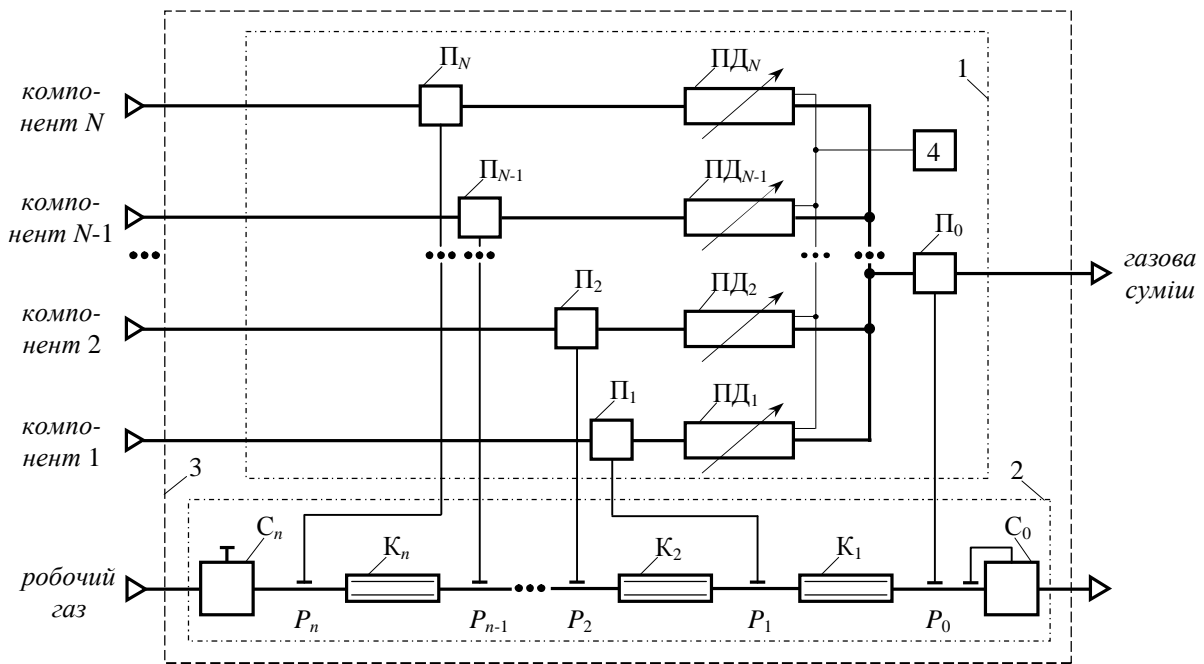


Рис. 1. Принципова схема ГДС багатокомпонентної суміші із живленням від подільника тиску.

1 – змішувач чистих газових компонентів; 2 – вузол задання стабілізованих тисків живлення (подільник тиску); 3 – термостат; 4 – блок задання концентрацій компонентів суміші.

ПД₁, ..., ПД_N – пакети капілярів; П₀, ..., П_N – повторювачі тиску; К₁, ..., К_n – капіляри подільника тиску; P₁, ..., P_{n-1} – міжросельні тиски подільника; C₀ – стабілізатор абсолютного тиску P₀ на виході подільника; C_n – задавач (стабілізатор) тиску P_n на вході подільника

На входи змішувача 1 від джерел стиснутих газів подають чисті компоненти 1, ..., N суміші, які проходять відповідними каналами, в кожному з яких встановлені послідовно з'єднані повторювач Pi тиску і пакет ПДi капілярних трубок. Повторювачі відтворюють міжросельні тиски подільника 2 на входах і виходах дозуючих капілярних трубок пакетів ПД₁, ..., ПД_N змішувача 1. Дозовані газові потоки з виходів капілярних елементів усіх пакетів змішуються, а отримана газова суміш надходить до споживача.

Як бачимо з рис.1 вихідний тиск P₀ подільника підтримують постійним, використовуючи стабілізатор C₀ абсолютного тиску “до себе”, а зміну значень тисків P₁, ..., P_n в такому подільнику здійснюють зміною завдання стабілізатора C_n, встановленого на вході подільника. У лінійному подільнику при зміні вхідного тиску P_n всі міжросельні тиски отримують пропорційний приріст одного знака, що забезпечує компенсацію зміни витрат компонентів суміші через капіляри змішувача 1, чого неможливо досягнути у разі застосування в лінії кожного компонента окремих стабілізаторів чи відтворення тисків за допомогою повторювачів, камери задання яких під'єднані до різних джерел тиску. Зміною вхідного тиску P_n живлення можна плавно змінювати значення міжросельних тисків, а отже, і витрату синтезованої газової суміші із незмінною заданою концентрацією компонентів.

З метою усунення впливу температури навколишнього середовища на міжросельні тиски подільника і на концентрацію компонентів суміші температуру всіх елементів ГДС стабілізують за допомогою термостата 3.

Концентрації компонентів у синтезованій суміші можна задавати залученням відповідних кількостей капілярних елементів у пакетах відповідних компонентів змішувача 1, для чого на виході усіх капілярів встановлені електромагнітні клапани (на рис.1 не показані), сигнал на “ввімкнення-вимкнення” яких надходить з електронного блока 4.

Для усунення впливу зміни тисків живлення ГДС на концентрацію компонентів суміші, а також для уможливлення регулювання витрати синтезованої суміші всі капіляри змішувача мають бути виконані з лінійними витратними характеристиками, тобто з такими геометричними розмірами прохідних каналів, які забезпечують умову [9]

$$P_0^2 \cdot Y_{ij} = 1, \quad (1)$$

де: P_0 – тиск газу на виході капілярних елементів; $Y_{ij} = K_{ij} \cdot X_i$ – комплекс розмірів каналу капіляра, параметрів газових компонентів; $K_{ij} = \xi \cdot d_{ij}^4 / l_{ij}^2$ – конструктивний комплекс; d_{ij} і l_{ij} – довжина і діаметр прохідного каналу j -го дозуючого капілярного елемента i -го пакета змішувача; $i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, m_i}$, m_i – кількість капілярних елементів i -го пакета; ξ – коефіцієнт кінцевих ефектів; $X_i = (512 \mathfrak{R}_i \cdot T \cdot \mu_i^2)^{-1} = 2,349085 \cdot 10^{-7} M_i / (T \cdot \mu_i^2)$ – параметричний комплекс i -го компоненту суміші; \mathfrak{R}_i – газова стала i -го компоненту; μ_i – динамічна в'язкість i -го газового компоненту за температури T ; M_i – молекулярна маса i -го компоненту приготволюваної суміші.

Моделювання подільника тиску. Схема подільника тиску є послідовним з'єднанням довільної кількості n капілярних елементів (див. рис.2), з'єднаних між собою трубками, газодинамічний опір яких на кілька порядків є меншим, ніж будь-якого з капілярів подільника. З'єднувальні трубки утворюють міждросельні камери і для зменшення інерційності подільника їх довжину беруть якнайменшою. Кожну камеру можна під'єднати до повторювача тиску.

Подільник тиску залежно від призначення може працювати у двох режимах: перший – коли крім тиску P_0 стабілізованого також вхідний P_n , а тим самим і всі міждросельні тиски P_1, \dots, P_{n-1} ; другий режим – коли тиск P_n змінюють в межах від P_0 до $P_{n \max}$ і відповідно змінюються значення міждросельних тисків P_1, \dots, P_{n-1} .

Перший режим застосовують для роботи подільника як задавача постійних тисків живлення, зокрема, газоаналітичних пристроїв чи апаратів синтезу газових сумішей. Одним пристроєм на базі подільника можна задавати потрібну кількість різних як абсолютних (надлишкових) тисків, так і перепадів тиску, що зменшує кількість застосовуваних стабілізаторів тиску та вплив тисків живлення.

Другий – коли тиски живлення відповідних засобів потрібно плавно змінювати, наприклад, для задання різних витрат синтезованої суміші чи одночасної перевірки приладів вимірювання тиску з різними діапазонами вимірювання [10, 11].

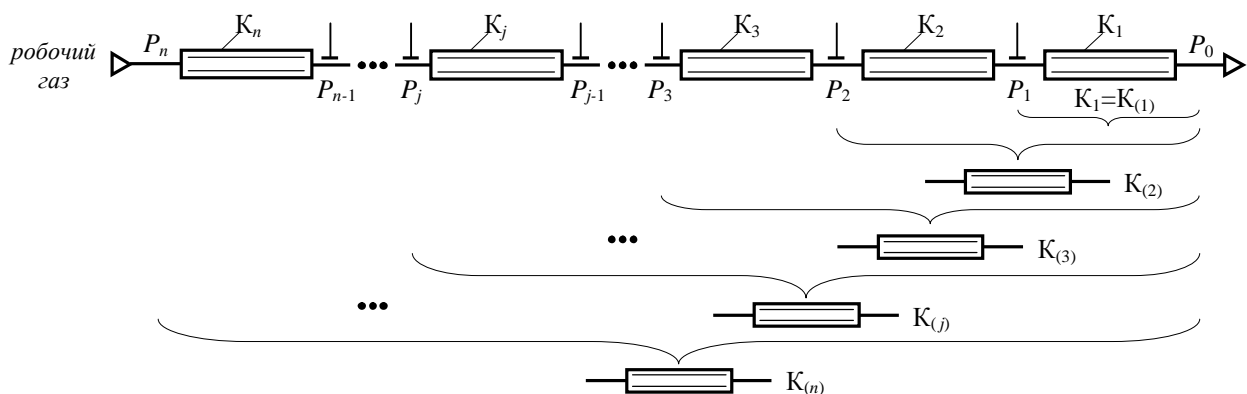


Рис.2 Принципова схема багатоелементного капілярного подільника тиску:

K_1, \dots, K_n – капілярні елементи; P_0, P_n – тиски живлення подільника; P_1, \dots, P_{n-1} – тиски в камерах перед відповідними капілярами; $K_{(2)}, \dots, K_{(n)}$ – еківалентні капілярні елементи, які замінюють відповідно 2, ..., n послідовно з'єднаних капілярів

Для обидвох режимів необхідно забезпечити лінійну зміну міждросельних тисків P_i подільника, тобто незмінність коефіцієнтів поділу k_i різниці $\Delta P = P_n - P_0$ тисків на подільнику:

$$k_i = (P_i - P_0) / \Delta P, \quad i = \overline{1, n-1}. \quad (2)$$

Базовою залежністю для моделювання подільника є витратна характеристика капіляра [2], яку доцільно подати у вигляді

$$G = A \cdot [(1 + Y \cdot B)^{1/2} - 1], \quad (3)$$

де, крім відомих, G – масова витрата газу; $A = 4 \pi \mu l / \xi$ – коефіцієнт витрати; $B = P_{вх}^2 - P_{вих}^2$ – комплекс тисків; $P_{вх}$ і $P_{вих}$ – значення абсолютного тиску робочого газу відповідно на вході і виході капіляра.

Для кожного капілярного елемента подільника можна записати рівняння витрати згідно з (3) і з врахуванням того, що масова витрата газу через усі його капіляри є однаковою ($G_1 = \dots = G_n = G$), отримати систему n нелінійних алгебраїчних рівнянь з n невідомими (P_1, \dots, P_{n-1} і G). Цю систему можна звести до одного рівняння, виключивши міждросельні тиски P_i , і подати у вигляді залежності витрати газу через подільник тиску від геометричних розмірів (d_i, l_i) прохідних каналів капілярів, параметрів робочого газу (μ, X) та перепаду тисків ΔP на подільнику. У результаті вказаних перетворень отримуємо

$$G = \{ [4 a \cdot (\Delta P + 2 P_0) \cdot \Delta P + b^2]^{1/2} - b \} / (2 a), \quad (4)$$

де $a = \sum_{i=1}^n A_i^{-2} \cdot Y_i^{-1} = (4\pi\mu)^{-2} \cdot X^{-1} \cdot \xi \cdot \sum_{i=1}^n d_i^{-4}$; $b = 2 \sum_{i=1}^n A_i^{-1} \cdot Y_i^{-1} = (2\pi\mu \cdot X)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot d_i^{-4}$.

Моделювання багатоелементного подільника з метою дослідження характеру зміни міждросельних тисків при зміні вхідного тиску подільника було виконане на базі залежностей (3) і (4). Нижче на конкретних прикладах наведено результати такого моделювання.

Приклад 1. Дослідження чотирьохелементного подільника тиску з довільно заданими геометричними розмірами прохідних каналів капілярних елементів: $d_1=0,25$ мм, $l_1=25,00$ мм; $d_2=0,15$ мм, $l_2=65,00$ мм; $d_3=0,25$ мм, $l_3=25,00$ мм; $d_4=0,15$ мм, $l_4=65,00$ мм.

Для цього та решти наведених прикладів робочим газом подільника є азот при температурі $T=300$ К; значення вихідного тиску $P_0=100$ кПа, діапазон зміни вхідного тиску $P_4 \in [P_0; 3P_0]$ кПа.

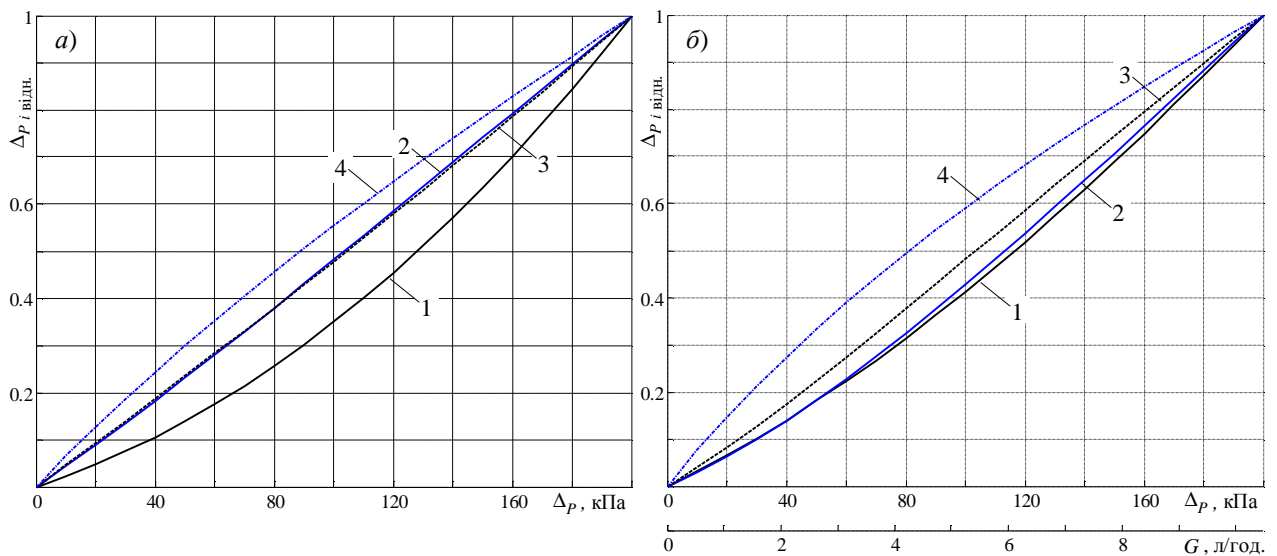


Рис.3 Залежність відносного перепаду тисків ΔP_i відн. на капілярах подільника від перепаду тисків ΔP на ньому і витрати G робочого газу через подільник:
а) довільної конструкції; б) побудований згідно з умовою (5)

На графіку рис. За наведено результати дослідження цього подільника тиску. На осі ординат відкладені значення відносного перепаду тиску $\Delta P_{i \text{ відн}} = \Delta P_i / \Delta P_{i \text{ max}}$, де $\Delta P_i = P_i - P_{i-1}$, ($i=1, \dots, n$) – перепад тиску на i -му капілярі подільника. Доцільність введення відносного перепаду тисків $\Delta P_{i \text{ відн}}$ зумовлена, передусім, тим, що він для довільних перепадів на капілярах змінюється в межах $[0; 1]$. Як очевидно з наведеного рисунку характеристика капілярів 1 і 4 виявилася істотно нелінійною з різною за знаком кривизною, а характеристика капілярів 2 і 3 виявилася близькою до лінійної. Очевидним є, що при зміні тиску живлення подільника прирости міждросельних тисків будуть непропорційними і тому такий подільник не можна рекомендувати для побудови системи стабілізованих тисків живлення пристроїв, зокрема, призначених для синтезу газових сумішей заданого складу.

Оскільки довільна конструкція подільника тиску не забезпечує потрібних характеристик – лінійності перепадів тиску на капілярах (міждросельних тисків) при зміні тиску на його вході чи витрати через подільник, тому доцільним є дослідити умови досягнення лінійності багатоеlementного подільника тиску.

Забезпечення лінійності витратної характеристики $G=f(\Delta P)$ подільника тиску потребує виконання такої умови: $d^2 G/d(\Delta P)^2=0$.

Після диференціювання (4) і перетворень умова лінійності витратної характеристики подільника набуває вигляду

$$P_0^2 = \frac{b^2}{4a} = \left[\sum_{i=1}^n (A_i \cdot Y_i)^{-1} \right]^2 \cdot \left[\sum_{i=1}^n (A_i^2 \cdot Y_i)^{-1} \right]^{-1}. \quad (5)$$

Можливість використання отриманої залежності (5) в плані забезпечення лінійності витратних характеристик елементів подільника покажемо на наступному прикладі.

Приклад 2. Дослідження чотирьохелементного подільника тиску з такими розмірами прохідних каналів капілярних елементів: $d_1=0,25$ мм, $l_1=25,00$ мм; $d_2=0,15$ мм, $l_2=10,00$ мм; $d_3=0,25$ мм, $l_3=11,15$ мм; $d_4=0,15$ мм, $l_4=31,50$ мм, які задовольняють умову (5).

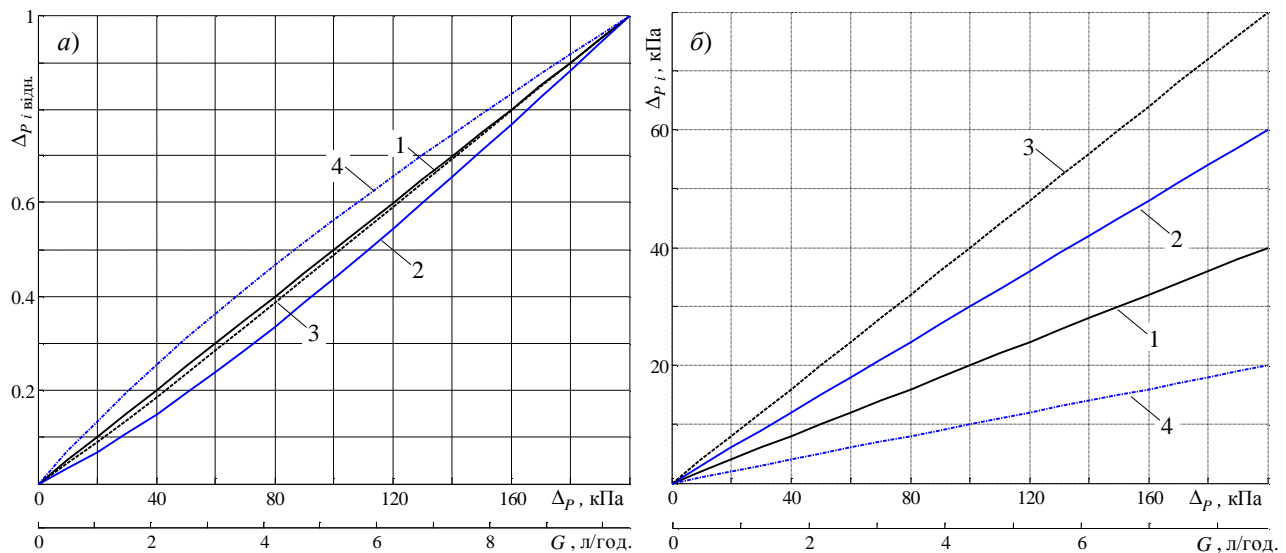


Рис.4 Залежність перепаду тисків на окремих капілярних елементах подільника від перепаду тисків на подільнику і витрати робочого газу через нього для конструкції, побудованої згідно із залежністю: а) – (6); б) – (10)

Результати дослідження цього подільника наведені на рис.3б.

Як зрозуміло з графіків, незважаючи на лінійність подільника загалом, залежність (5) також не забезпечує лінійності характеристик усіх капілярів подільника, а отже, і її не можна рекомендувати для побудови системи живлення газодинамічних синтезаторів.

Залежність (5) можна подати у безрозмірній формі, помноживши її ліву і праву частини на Y_1 і врахувавши умову (1). Після перетворень маємо

$$\left[1 + \sum_{i=2}^n \lambda_i^{-1} \cdot \delta_i^4 \right]^2 \cdot \left[1 + \sum_{i=2}^n \delta_i^4 \right]^{-1} = 1, \quad (6)$$

де: $\delta_i = d_1 / d_i$; $\lambda_i = l_1 / l_i$.

Отже, умова (6) задає лінійний подільник тиску загалом, в якому капілярний елемент K_1 подільника є також лінійним, а характеристики решти капілярних елементів цією умовою не окреслюються.

Приклад 3. Дослідження характеристик дроселів подільника тиску, побудованого згідно з умовою (6) з такими розмірами прохідних каналів капілярів: $d_1=0,25$ мм, $l_1=85,35$ мм; $d_2=0,15$ мм, $l_2=10,05$ мм; $d_3=0,25$ мм, $l_3=12,15$ мм; $d_4=0,15$ мм, $l_4=23,50$ мм.

З графіків, отриманих в результаті моделювання цього подільника і наведених на рис.4а, бачимо, що капіляри подільника (крім капіляра 1) залишаються нелінійними хоча мають меншу кривизну, ніж побудовані згідно із залежністю (5). Отже, для виконання поставленого завдання потрібно отримати умову лінійності всіх капілярів, які утворюють подільник тиску.

Побудова лінійного подільника. Лінійний подільник тиску – це такий подільник, в якому всі складові капіляри мають лінійну витратну характеристику $G_i = f(\Delta p_i)$, а отже, лінійною є і витратна характеристика $G = f(\Delta p)$ цілого подільника. Варто зауважити, що побудова лінійного подільника тиску можлива лише при постійному абсолютному тиску на його виході та незмінних параметрах робочого газу.

Витратна характеристика послідовного з'єднання капілярів з лінійною витратною характеристикою, тобто лінійного подільника тиску як цілого (з довільними характеристиками складових) може бути отримана із рівняння (4) після підставлення в нього умови (5), внаслідок чого маємо

$$G = a^{-1/2} \cdot \Delta p = \pi \cdot \left[32m \cdot \mathcal{R} \cdot T \cdot \sum_{i=1}^n d_i^{-4} \right]^{-1/2} \cdot \Delta p. \quad (6)$$

Для побудови лінійних подільників з усіма лінійними складовими капілярами доцільним є введення поняття еквівалентного капіляра, який при математичному моделюванні може замінити досліджувану схему (тут – послідовне з'єднання капілярних елементів). У такому розумінні еквівалентний капілярний елемент – це капіляр, витратна характеристика якого ідентична витратній характеристиці досліджуваної схеми. Поняття еквівалентних капілярів для багатоелементного подільника наочно ілюструється рис.2, на якому еквівалентні капілярні елементи позначені символом “К” з індексом у круглих дужках.

Витратна характеристика лінійного еквівалентного капілярного елемента, який заміщає багатоелементний подільник тиску з лінійною залежністю $G = f(\Delta p)$, одержана із залежностей (1), (3) і (6), має вигляд

$$G = \pi \cdot d_e^2 \cdot [32m \cdot \mathcal{R} \cdot T]^{-1/2} \cdot \Delta p. \quad (7)$$

Застосування поняття еквівалентного дроселя забезпечує отримання зручних у використанні рекурентних залежностей для розрахунку як діаметрів, так і довжин прохідних каналів капілярів лінійного подільника тиску, які можуть бути отримані послідовною заміною дроселів багатоелементного подільника еквівалентним дроселем (див.рис.2) та визначенням їх розмірів на кожному кроці (ітерації) через вже розраховані розміри прохідних каналів капілярних елементів.

Найдоцільнішим для одержання таких залежностей є застосування підходу, який базується на заміні будь-якого подільника двохелементним і використанні вже відомих для останнього залежностей.

Як зрозуміло із рис.2 такий підхід і застосований авторами для визначення розмірів прохідних каналів n -елементного подільника. Так, наприклад, подільник складений з j перших капілярних елементів замінений двохелементним, в якому першим по ходу газу є капіляр K_j , а другим – $K_{(j-1)}$, який є еквівалентним дроселем послідовного з'єднання перших $j-1$ капілярів вихідного багатоелементного подільника. Лінійний двохелементний подільник досліджували автори в [11].

Розрахунок n -елементного лінійного подільника тиску (одержання геометричних розмірів прохідних каналів всіх його капілярів) здійснюють з метою забезпечення потрібних значень міждросельних тисків P_1, \dots, P_{n-1} та можливості їх лінійної зміни при зміні тиску P_n на вході подільника. В [11] одержана залежність, яка пов'язує співвідношення довжин $\lambda_{(j-1)}$ прохідних каналів капілярів двохелементного подільника, його вхідного P_j , міждросельного P_{j-1} та вихідного P_0 тисків і для позначень та нумерації капілярів, прийнятих на рис.2, має вигляд:

$$P_{j-1} = \frac{\lambda_{(j-1)}}{1 - \lambda_{(j-1)}} \cdot (P_j - P_0) + P_0, \quad (8)$$

де $j = \overline{2, n}$; $\lambda_{(j-1)} = l_j / l_{(j-1)}$.

Із (8) можна визначити $\lambda_{(j-1)}$ і виразити довжину l_j прохідного каналу K_j капіляра через довжину $l_{(j-1)}$ прохідного каналу еквівалентного дроселя $K_{(j-1)}$ та перепади тиску на цих дроселях або коефіцієнти поділу (див. друге рівняння системи (10)). Зауважимо, що залежність (1), яка пов'язує геометричні розміри прохідних каналів лінійних капілярів, застосовують для розрахунку розмірів як першого капіляра K_1 подільника (наприклад, для забезпечення необхідного значення витрати через нього) так і розмірів еквівалентних дроселів.

Визначити діаметр d_j прохідного каналу j -го капіляра багатоелементного подільника, перетвореного у двохелементний, можна згідно із залежності, наведеної в [11] і подану як

$$\delta_{(j-1)}^4 = \frac{\lambda_{(j-1)}^2}{1 - 2\lambda_{(j-1)}}, \quad (9)$$

де $\delta_{(j-1)} = d_j / d_{(j-1)}$.

Із (9) визначають $\delta_{(j-1)}$ і виражають діаметр d_j прохідного каналу K_j капіляра через діаметр $d_{(j-1)}$ прохідного каналу еквівалентного дроселя $K_{(j-1)}$ та співвідношення довжин $\lambda_{(j-1)}$ відповідних капілярів, яке (співвідношення довжин) також можна представити через перепади тиску на цих дроселях або коефіцієнти поділу (див. перше рівняння системи (10)).

Система рівнянь для визначення розмірів прохідних каналів усіх капілярів лінійного подільника із заданими значеннями міждросельних тисків (коефіцієнтів поділу) має вигляд

$$\left. \begin{aligned} d_j &= d_{(j-1)} / g_j; \\ l_j &= l_{(j-1)} / y_j; \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

де: $j = \overline{2, n}$; $d_{(j-1)} = \left[\sum_{i=1}^{j-1} d_i^{-4} \right]^{-1/4}$; $g_j = \left(D_{(j-1)}^2 - 1 \right)^{1/4}$; $l_{(j-1)} = \kappa \cdot d_{(j-1)}^2$; $y_j = D_{(j-1)} + 1$;

$$D_{(j-1)} = D_{j-1} / D_j; \quad D_{j-1} = \Delta_P / \Delta_{P_{j-1}} = 1/k_{j-1}; \quad \Delta_{P_{j-1}} = P_{j-1} - P_0; \quad \kappa = P_0 \cdot \sqrt{\xi \cdot X}.$$

Приклад 4. Побудова і дослідження чотирьохелементного лінійного подільника тиску з такими значеннями коефіцієнтів поділу: $k_1=0,6$; $k_2=0,75$; $k_3=0,95$.

Діаметр d_1 прохідного каналу першого капіляра K_1 приймаємо таким, що дорівнює 0,25 мм.

За системою (10) визначаємо решту розмірів прохідних каналів капілярних елементів: $l_1=85,35$ мм; $d_2=0,190$ мм, $l_2=28,45$ мм; $d_3=0,124$ мм, $l_3=13,13$ мм; $d_4=0,169$ мм, $l_4=8,98$ мм.

На графіках рис. 4б наведено результати дослідження такого подільника тиску. Як бачимо із наведених графіків залежність перепадів тисків Δp_i на капілярах подільника від зміни вхідного тиску є лінійною. Очевидним є те, що при зміні тиску живлення подільника прирости міждросельних тисків будуть пропорційними і тому такий подільник можна рекомендувати для побудови системи стабілізованих тисків живлення пристроїв, зокрема, призначених для синтезу газових сумішей заданого складу.

Висновки. Запропонована схема ГДС, в якій застосований подільник тиску для задання потрібних стабілізованих тисків живлення змішувача. Отримані залежності для побудови багатоеlementного лінійного подільника тиску як основної складової системи живлення ГДС, який забезпечує постійні задані значення коефіцієнтів поділу перепаду тиску на подільнику. Застосування таких подільників для задання стабілізованих тисків живлення в синтезаторах забезпечує приготування газових сумішей заданого складу з малими концентраціями окремих компонентів та можливістю плавної зміни витрати отримуваної суміші на виході змішувача.

1. Четвертий міжнародний симпозиум з аналізу газів GAS2007. 14-16 лютого 2007 р. м.Роттердам. <http://ukrcsm.kiev.ua/> 2. Теплюх З.М. Принципи побудови високоточних дросельних синтезаторів газових сумішей //Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" №551, "Автоматика, вимірювання та керування", – 2006. – С.87–94. 3. Газосмесительное устройство: А.с. № 1363151 СССР / В.В.Вильдермут и др. (СССР). – Оп. Б.И., 1987, № 48. 4. Патент 4605034 США. Gas flow control system for an anesthesia apparatus / Y.Urushida / Oct. 23, 1984. 5. Прохоров В.А. Основы автоматизации аналитического контроля химических производств. – М.: Химия, 1984. – 320 с. 6. Пистун Е.П., Теплюх З.Н., Брилинский Р.Б. Исследование погрешностей стабилизаторов давления в газоанализаторах //Контрольно-измерительная техника, №40. – Львов: Вища школа, 1986. – С.23–27. 7. Теплюх З.М., Ділай І.В. Експериментальне дослідження вирівнювача тисків // Теплоенергетика. Інженерія докiлля. Автоматизація №318 /Вісник Держ. ун-ту "Львівська політехніка". – Львів, 1997. – С.72–75. 8. Теплюх З.М., Ділай І.В. Пристрій для приготування штучного природного газу // Методи та прилади контролю якості, вип.12, 2004. – Ів.-Франківськ. – С.42–48. 9. Пистун Е.П., Теплюх З.Н., Ділай І.В., Друль Я.Г. Линейные газодинамические дрессели и их применение в газоаналитической технике // Контрольно-измерительная техника, вып.47. – Львов: Вища школа, 1990. – С.28–30. 10. Друль Я.Г. Пристрій для автоматичної перевірки пневматичних вимірювальних перетворювачів перепаду тиску //Вісник Львівського політехнічного інституту № 266, 1992. – С.36–39. 11. Пістун Є., Теплюх З., Друль Я., Ділай І. Лінійні подільники тиску та їх використання в контрольно-вимірювальній техніці. // Контрольно-вимірювальна техніка, вип. 50. – Львів: Світ, 1993. – С.45–48.