

8. Ротач, В. Я. Расчет настройки реальных ПИД регуляторов [Текст] / В. Я. Ротач // Теплоэнергетика. – 1993. – № 10. – С. 31–35.
9. Кроніковський, Д. О. Застосування багатопараметричних регуляторів для складних технологічних об'єктів [Текст] / Д. О. Кроніковський, А. П. Ладанюк // Харчова промисловість. – 2009. – № 8. – С. 104–109.
10. Смирнов, Н. И. Оптимизация одноконтурных АСР с многопараметрическими регуляторами [Текст] / Н. И. Смирнов, В. Р. Сабанин, А. И. Репин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2005. – № 7. – С. 71–77.
11. Смирнов, Н. И. Робастные многопараметрические регуляторы для объектов с транспортным запаздыванием [Текст] / Н. И. Смирнов, В. Р. Сабанин, А. И. Репин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2006. – № 7. – С. 82–86.
12. Лагойда, А. І. Аналіз динамічних властивостей відцентрового нагнітача ГПА з газотурбінним приводом як об'єкта керування [Текст] / А. І. Лагойда, Ю. Є. Бляут, Є. М. Лесів, Г. Н. Семенцов // Нафтогазова енергетика. – 2012. – № 2 (18). – С. 72–85.
13. Лагойда, А. І. Метод підвищення швидкодії системи автоматичного антипомпажного регулювання газоперекачувального апарату [Текст] / А. І. Лагойда, Г. Н. Семенцов // Сборник научных трудов SWorld. – 2013. – № 9. – С. 35–45.

Досліджені та представлені основні властивості базових з'єднань дросельних елементів, які впливають на характеристики газодинамічних засобів, зокрема систем приготування сумішей. Продемонстровано ефективність поєднання досліджених дросельних схем на прикладі створення газодинамічних систем синтезу складних сумішей з мікроконцентраціями компонентів і з політисеними метрологічними (точність задання і підтримання концентрацій компонентів) та експлуатаційними характеристиками

Ключові слова: базова дросельна схема, газодинамічна система, синтез газових сумішей, капіляр

Исследованы и представлены основные свойства базовых соединений дросельных элементов, которые влияют на характеристики газодинамических средств, в частности систем приготовления смесей. Продемонстрирована эффективность сочетания исследованных дросельных схем для разработки газодинамических систем синтеза сложных смесей с микроконцентрациями компонентов, которые имеют улучшенные метрологические (точность задания и поддержания концентраций компонентов) и эксплуатационные характеристики

Ключевые слова: базовая дросельная схема, газодинамическая система, синтез газовых смесей, капилляр

УДК 681.2.53.082.3

ОПТИМАЛЬНИ ДРОСЕЛЬНІ СХЕМИ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ ПРИГОТУВАННЯ СКЛАДНИХ ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ

І. В. Ділай

Кандидат технічних наук*

E-mail: divlv@ukr.net

З. М. Теплюх

Доктор технічних наук*

E-mail: atxp2010@gmail.com

Ю. З. Вашкурак

Кандидат технічних наук*

E-mail: vyzlv@ukr.net

*Кафедра автоматизації теплових і

хімічних процесів

Національний університет

«Львівська політехніка»

вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

1. Вступ

До дросельних систем і пристроїв можна віднести складні сполучення різнотипних дроселів в пневмоавтоматиці, зокрема, системи транспортування газу, задання тисків і витрат, кондиціонування і дозування проби газу, приготування газових сумішей тощо [1, 2]. Серед таких систем розмаїттям і кількістю дроселів схем відзначаються системи приготування (синтезу) газових сумішей заданого складу, особливо це стосується систем неперервного (динамічні системи) синтезу складних багатоконцентричних газових сумішей з мікроконцентраціями окремих компонентів [3, 4]. До основних базових схем можна віднести суматор

потоків, подільник газового потоку, пакет капілярів, подільник тиску, а також каскадні з'єднання подільників тиску і подільників газового потоку.

Крім того, у таких схемах як дроселі в принципі можуть бути застосовані різні конструктивні елементи – циліндричні довгі канали, круглі отвори, сопло-заслінка, конус-сідло тощо [2]. Очевидним є, що як від самої схеми системи так і типу її елементів будуть суттєво залежати її характеристики. У зв'язку з цим для моделювання відомих систем, а також побудови нових з якісними характеристиками, необхідно виокремити із загальних схем і дослідити типи елементарні (базові) схеми, дослідження яких забезпечили би виявлення корисних властивостей для побудови систем

з високими метрологічними і експлуатаційними властивостями.

2. Аналіз досліджень і публікацій

Аналіз останніх публікацій показує, що в доступних нам літературних джерелах висвітлені методи і засоби поліпшення властивостей дросельних систем, зокрема систем синтезу газових сумішей заданого складу, в основному завдяки використанню точнішої апаратури, наприклад, застосування якіснішого стабілізування факторів впливу [3, 4]. Щодо дросельних схем, то у відкритих літературних джерелах описані подільники тисків, проте недостатньо повно і системно з точки зору ефективного їх застосування для побудови високоточних засобів синтезу газових сумішей заданого складу представлена інформація про інші базові дросельні схеми [3–6].

У роботі [7], присвяченій побудові динамічних засобів приготування газових сумішей, також недостатньо висвітлені властивості основних базових схем з'єднання дросельних елементів та їх оптимального поєднання в газодинамічних системах синтезу сумішей з мікроконцентраціями компонентів, тому подальше дослідження таких дросельних схем є актуальною задачею.

3. Мета роботи

Для створення систем приготування газових сумішей з поліпшеними метрологічними і експлуатаційними характеристиками першочерговим є виявлення нових властивостей основних базових схем з'єднання дросельних елементів.

Вирішення поставленої мети потребує побудови моделей базових схем, оптимізації конструктивних параметрів дроселів схем і доведення можливості поліпшення властивостей дросельних систем на основі оптимального поєднання базових з'єднань дроселів.

4. Базові дросельні схеми

Газодинамічні системи синтезу сумішей (синтезатори) можна будувати з використанням практично всіх згаданих з'єднань дроселів, належне застосування яких при розробленні принципових схем систем синтезу визначає їх метрологічні характеристики. У схемах синтезаторів застосовують переважно турбулентні (наприклад, годинникові камені) і ламінарні (зокрема, скляні капілярні трубки) дозуючі дросельні елементи [2, 8]. Проте перевагу слід надавати капілярам, оскільки при певному співвідношенні розмірів їх прохідних каналів можна одержати лінійну витратну характеристику (ВХ), а також забезпечити плавне підбирання газодинамічного опору зміною довжини прохідного каналу.

Основними напрямками у дослідженні базових з'єднань дроселів є вивчення та забезпечення умов зменшення зовнішніх впливів (температури, барометричного тиску тощо), а також знешкодження факторів, спричинених нестабільністю засобів, застосовуваних для підтримання постійних тисків і витрат.

4. 1. Суматори потоків

Газодинамічні синтезатори будують на основі схеми суматора потоків, представленого на рис. 1, а, а для одержання сумішей з мікроконцентраціями компонентів залучають ще подільники потоків (рис. 1, б) [7].

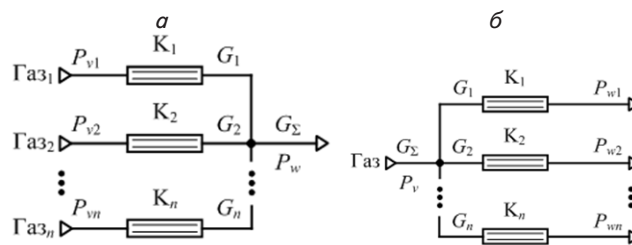


Рис. 1. Принципова схема: а – суматора n газових потоків; б – подільника газового потоку на n частин

Як видно з рис. 1, а за допомогою дозуючих дроселів – капілярів K_1, \dots, K_n , встановлених в каналах суматора, задають витрати G_1, \dots, G_n компонентів суміші при відповідних перепадах тисків $\Delta P_1, \dots, \Delta P_n$, де $\Delta P_i = P_{vi} - P_w$. Тиски P_{vi} на входах капілярів можуть бути різними, тоді як на їх виході тиск P_w , як правило, задають однаковим. Дозовані газові потоки з виходів капілярів змішуються і утворюють суміш із відповідними концентраціями r_i компонентів.

Математичну модель статички суматора n газових потоків у загальному можна представити у вигляді системи рівнянь

$$\left. \begin{aligned} G_i &= f_i(P_{vi}, P_w, d_i, l_i, R_{gi}, \mu_i, M_i, T); \\ G_\Sigma &= \sum_{i=1}^n G_i; \quad i = \overline{1, n}; \\ \max(4G_i [\pi \mu_i d_i]^{-1}) &\leq 2320; \\ d_{\min} \leq d_i \leq d_{\max}; \quad l_{\min} \leq l_i \leq l_{\max}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Перше рівняння системи (1) відображає функціональну залежність масової витрати G_i через i -й капіляр, яку можна подати у вигляді [7]:

$$G_i = A_i \left[\sqrt{1 + K_i X_i B_i} - 1 \right], \quad (2)$$

де $A_i = (4\pi \mu_i / \xi) l_i = a_i l_i$ – коефіцієнт витрати; μ_i – коефіцієнт динамічної в'язкості i -го компонента газової суміші за температури T ; ξ – коефіцієнт кінцевих ефектів; $K_i = \xi d_i^4 / l_i^2$ – конструктивний комплекс; d_i і l_i – відповідно діаметр і довжина прохідного каналу i -го капіляра; $X_i = (512 R_{gi} T \mu_i^2)^{-1}$; $R_{gi} = R_\mu / M_i$ – газова стала; R_μ – універсальна газова стала; M_i – молекулярна маса i -го компонента; $B_i = P_{vi}^2 - P_w^2$ – комплекс тисків.

На основі математичної моделі статички капіляра (2) одержана залежність, що пов'язує розміри (d і l) прохідного каналу лінійного капіляра при постійних температурі T дозованого газу і тиску P_w на виході капіляра, яка має вигляд [7]

$$P_w^2 Y = 1, \quad (3)$$

де $Y = KX$ – комплекс розмірів каналу капіляра і параметрів газового потоку.

Застосування капілярів з ВХ, визначеними за допомогою (3) суттєво поліпшує метрологічні характеристики газодинамічних пристроїв, зокрема синтезаторів газових сумішей [7, 9].

Друге рівняння системи представляє закон Кірхгофа для вузла сумування потоків компонентів суміші або галузнення вхідного потоку на складові (див. нижче підрозділ про подільники потоку).

Нерівностями у системі (1) задані умови роботи і обмеження конструкції капілярів, згідно з якими значення критерію Рейнольдса Re для забезпечення ламінарного режиму протікання газу в каналах капілярів не повинне перевищувати 2320, а обмеження на розміри прохідних каналів капілярів – $d_{min}=0,05$ мм, $d_{max}=0,5$ мм і $l_{min}=5$ мм, $l_{max}=150$ мм, прийняті з практичних міркувань для застосування у газодинамічних системах.

Концентрацію r_i i -го компонента синтезованої суміші визначають згідно із рівнянням $r_i = G_i / G_{\Sigma}$.

Незмінність концентрацій компонентів на виході схеми суматора можна забезпечити завдяки підтриманню постійних параметрів роботи схеми (тисків і температури) або ж компенсації їх можливих змін в процесі приготування сумішей.

Одержані залежності для визначення розмірів капілярів змішувача синтезатора бінарної суміші, які враховують нелінійність залежності в'язкості від температури і нерівність перепадів тисків на капілярах, уможливають компенсацію основних факторів впливу [9]:

– температури

$$K_2 = \frac{\bar{M}^2(1+Z_1)-1}{X_2 B_2};$$

$$l_2 = (r_1^{-1} - 1) \frac{\mu_1 \sqrt{1+Z_1}-1}{\mu_2 \sqrt{1+Z_2}-1} l_1, \quad d_2 = (K_2 l_2^2 / \xi)^{1/4}, \quad (4)$$

де, крім відомих, r_1 – концентрація першого компонента бінарної газової суміші; $i=1, 2$; $Z_i = K_i X_i B_i$ – комплекс розмірів прохідного каналу капіляра і параметрів стану газу; $\bar{M} = \bar{\mu}_2 \bar{\mu}_1^{-1} \mu_1 \mu_2^{-1}$; $\bar{\mu}_1 = \mu_1 + 2(2a_{2,1} T + a_{1,1}) T$; $\bar{\mu}_2 = \mu_2 + 2(2a_{2,2} T + a_{1,2}) T$; $\mu_i = a_{2,i} T^2 + a_{1,i} T + a_{0,i}$ – в'язкість газових компонентів суміші; $a_{2,i}$, $a_{1,i}$, $a_{0,i}$ – коефіцієнти квадратичної апроксимації в'язкості газових компонентів;

– тисків

$$l_2 = \frac{r_2 \mu_1}{r_1 \mu_2} l_1; \quad d_2 = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{1/2} \left(\frac{B_1 R_{g2}}{B_2 R_{g1}} \right)^{1/4} d_1. \quad (5)$$

Залежності (4) і (5) одержані для бінарних сумішей, проте їх можна застосувати і для визначення розмірів капілярів змішувача n компонентної суміші, для чого її потрібно представити як композицію $n-1$ відповідних бінарних сумішей.

4. 2. Подільники потоків

Для створення газодинамічних систем приготування газових сумішей з мікро- і наноконцентраціями компонентів, зокрема, для зменшення витрати газового компонента (суміші), яку подають на на-

ступню стадію розчинення, застосовують подільники потоків [7].

Представлена на рис. 1, б схема подільника потоку (G_{Σ}) призначена для його поділу на n окремих потоків, значення витрати (G_1, G_2, \dots, G_n) в кожному з каналів визначається газодинамічним опором (провідністю) встановлених капілярів. Тиски на входах дроселів подільника потоку є однаковими, а на виході кожного дроселя їх можна встановити як однаковими ($P_{w1} = \dots = P_{wn} = P_0$), так і різними за допомогою повторювачів чи стабілізаторів тисків.

Математичну модель капілярного подільника потоків в загальному можна представити у вигляді системи (1) лише з тою відмінністю, що перше рівняння потрібно записати для одного виду газу (R_g, μ, M) і однакових вхідних тисків P_v для всіх капілярів подільника потоків.

Вхідний потік газу можна ділити на рівні за значенням потоки у разі застосування рівноопорових капілярів, або на будь-які інші, наприклад, з провідностями кратними 2. При цьому кратність поділу потоків на виході подільника є постійною і при зміні тиску на його вході у разі застосування капілярів з лінійними або однакою кривизни ВХ. Якщо кривизна не є однакою, то такий подільник не забезпечує постійного заданого співвідношення витрат потоків при зміні вхідного тиску, проте він може працювати, якщо стабілізувати вхідні і вихідні тиски для усіх капілярів.

Застосування лінійних капілярів в подільниках потоків уможливує роботу подільника без стабілізації вхідних тисків і забезпечує їх високі метрологічні характеристики.

4. 3. Паралельне з'єднання капілярів. Пакети капілярів

Цей тип з'єднання дроселів застосовують, зокрема, в газодинамічних синтезаторах для приготування сумішей із різними концентраціями компонентів, задавачах витрати [7, 9]. Таке з'єднання оформляють у вигляді пакета (рис. 2, а) з одним спільним входом газового потоку та спільним виходом для збільшення загальної витрати в каналі відповідного компонента. Для зміни витрати і задання відповідної концентрації компонента суміші залучають капіляри визначеної провідності, на виході кожного з яких встановлений двопозиційний клапан Кл (рис. 2, б).

Це з'єднання у схемах пристроїв може працювати у двох режимах: а) при *постійному* перепаді тиску Δp (чи невеликих змінах заданого перепаду) та б) *змінному* Δp (в широкому діапазоні зміни тисків). Для моделювання схем виникає необхідність заміни такого з'єднання одним еквівалентним капіляром. Заміщення паралельного з'єднання капілярів одним еквівалентним для кожного з цих режимів має свої особливості [10].

При роботі пакета капілярів у режимі а) витрату G_p газу через пакет n паралельно з'єднаних капілярів визначають згідно з (2) як суму витрат через кожен капіляр для заданого Δp , тобто

$$G_p = a_1 \sum_{i=1}^n \left\{ l_i \left[\sqrt{1 + \xi X B d_i^4 / l_i^2} - 1 \right] \right\}, \quad (6)$$

де, крім відомих, $a_i = 4\pi \mu / \xi$; i – порядковий номер капіляра пакета.

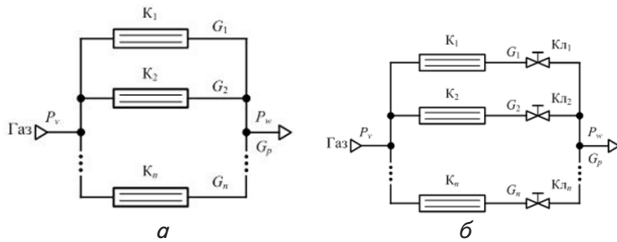


Рис. 2. Схема паралельного з'єднання капілярів K_1, \dots, K_n пакета для: *a* – збільшення постійної витрати G_p ; *б* – зміни витрати залученням вибірки капілярів за допомогою клапанів K_{1, \dots, K_n}

Значення постійного перепаду тисків ΔP вибирають із умов роботи пакета у схемі пристрою. За відомого значення витрати G_p і вибраного діаметра d_e прохідного каналу еквівалентного капіляра із залежностей (2) і (6) одержують вираз для його довжини l_e при тому ж ΔP

$$l_e = 0,5(\xi a_1 d_e^4 X B G_p^{-1} - a_1^{-1} G_p), \quad (7)$$

а у разі задання довжини l_e каналу капіляра аналогічно отримують вираз для визначення його діаметра d_e із залежності

$$d_e^4 = l_e^2 (\xi X B)^{-1} \left\{ \left[G_p / A + 1 \right]^2 - 1 \right\}. \quad (8)$$

де $A = a_1 l_e$ – коефіцієнт витрати.

У результаті одержують еквівалентний капіляр, який дає ту ж витрату G_p , що і пакет при заданому значенні перепаду тисків ΔP .

При роботі у режимі б) нами запропонований спосіб заміщення пакета, який полягає в одержанні розмірів (d_e, l_e) еквівалентного капіляра із системи двох рівнянь, записаних для двох масових витрат G_{p1} і G_{p2} газу через пакет відповідно для двох різних B_1 і B_2 , тобто для різних перепадів тиску ΔP_1 і ΔP_2 , які залежать від умов роботи пакета [10].

Вирази для визначення розмірів еквівалентного капіляра у цьому разі можна представити так

$$d_e^4 = \frac{G_{p1} G_{p2} (G_{p2} - G_{p1})}{\xi a_1^2 X (G_{p1} B_2 - G_{p2} B_1)},$$

$$l_e = \frac{G_{p2}^2 B_1 - G_{p1}^2 B_2}{2 a_1 (G_{p1} B_2 - G_{p2} B_1)}. \quad (9)$$

Заміщення пакета еквівалентним капіляром, одержаним згідно із (7)–(9) забезпечує можливість розрахунку і моделювання дросельних схем у різних режимах роботи.

4. 4. Послідовне з'єднання капілярів. Подільники тиску

Послідовне з'єднання капілярів, як і паралельне знаходить застосування у газодинамічних системах синтезу, зокрема, воно покладене в основу розроблених нами блоків стабілізованих тисків для задання перепадів тисків на дозуючих капілярах [9], а також дросельних мостів для підбирання газодинамічних опорів капілярів на одному газі.

4. 4. 1. Двоелементний подільник тиску

Двоелементний подільник тиску (рис. 3, *a*) утворюють два послідовно з'єднані дроселі – капіляри K_1 (d_1, l_1) і K_2 (d_2, l_2). На вході капіляра K_2 задають тиск P_2 , а на виході K_1 – P_0 , а значення міждросельного тиску P_1 визначають згідно із залежністю, наведеною нижче.

При побудові газодинамічних засобів також доцільно застосовувати двоелементні подільники, в яких замість окремого капіляра використовують як постійні, так і змінні пакети (рис. 3, *б*). Для задання багатьох різних тисків (перепадів) можна застосовувати багатоелементні подільники (рис. 3, *в*).

Міждросельний тиск P_1 у двоелементному подільнику задають вибіркою відповідно капілярів $K_{1,j}$ ($d_{1,j}, l_{1,j}; i \in \{1, \dots, n_1\}$) в пакеті Π_1 і $K_{2,i}$ ($d_{2,i}, l_{2,i}; i \in \{1, \dots, n_2\}$) в пакеті Π_2 . Капіляри у відповідних пакетах подільника мають однакові розміри прохідних каналів.

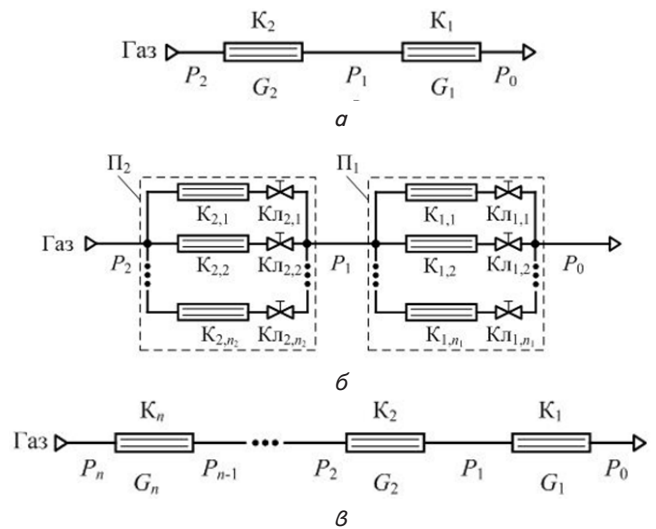


Рис. 3. Приклади принципів схем подільників тиску: *a* – двоелементний з постійними дроселями; *б* – двоелементний змінного опору; *в* – багатоелементний

Значення тиску P_1 у двоелементному капілярному подільнику із залученими $n_1=N_1$ капілярами пакета Π_1 і $n_2=N_2$ капілярами пакета Π_2 визначають згідно із залежністю

$$P_1 = \left[\frac{\delta_n^4 P_2^2 + P_0^2}{V_n} + \frac{2(\lambda_n - 1)}{U_n V_n} \left(W_n - \sqrt{W_n^2 + U_n \delta_n^4 (P_2^2 - P_0^2)} \right) \right]^{1/2}, \quad (10)$$

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

Згідно із (10) значення міждросельного тиску P_1 можна визначити для різних двоелементних подільників – як для подільника, складеного з двох окремих капілярів ($n_1=1, n_2=1$), так і подільників з пакетом і окремим капіляром ($n_1=N_1, n_2=1; n_1=1, n_2=N_2$, де N_1, N_2 – кількість залучених капілярів пакета).

Міждросельний тиск P_1 подільника з пакетами, кожен з яких містить капіляри з різними розмірами прохідних каналів, визначають числовим методом із нелінійного рівняння:

$$\sum_{i \in \{1, \dots, n_2\}} l_{2,i} \left[\sqrt{1 + \xi d_{2,i}^4 / l_{2,i}^2 X B_2} - 1 \right] - \sum_{j \in \{1, \dots, n_1\}} l_{1,j} \left[\sqrt{1 + \xi d_{1,j}^4 / l_{1,j}^2 X B_1} - 1 \right] = 0, \quad (11)$$

де $d_{1,j}, l_{1,j}$ і $d_{2,i}, l_{2,i}$ – розміри прохідного каналу i -го ($i=1, \dots, n_1$) капіляра відповідно пакета Π_1 і j -го ($j=1, \dots, n_2$) капіляра пакета Π_2 ; B_1 і B_2 – комплекси тисків, які визначають згідно з виразами $B_1 = P_1^2 - P_0^2$ і $B_2 = P_2^2 - P_1^2$.

Основною характеристикою подільника є коефіцієнт $k_i = (P_i - P_0) / (P_2 - P_0)$ поділу тисків. Іноді зручно використовувати коефіцієнт χ , обернений до k , який характеризує зменшення відношення перепаду тиску на окремому капілярі порівняно із перепадом на всьому подільнику. Наприклад, зменшення перепаду тиску для першого капіляра – $\chi_1 = (P_2 - P_0) / (P_1 - P_0)$.

4. 4. 2. Багатоелементний подільник

Для проектування газодинамічних засобів часто потрібно визначати міждросельні тиски (P_1, \dots, P_{n-1}) багатоелементного подільника (рис. 3, в), складеного з капілярів відомих розмірів прохідних каналів – $d_i \in \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ і $l_i \in \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$, при заданих значеннях вхідного P_n та вихідного P_0 тисків подільника, а також відомого виду газу при температурі T .

Рекурентна залежність для визначення міждросельних тисків P_i подільника має вигляд

$$P_i = \left(Y_i^{-1} \left[\left(G / A_i + 1 \right)^2 - 1 \right] + P_{i-1}^2 \right)^{1/2}, \quad (12)$$

де $G = 0,5a^{-1} \left[-b + \sqrt{b^2 - 4ac} \right]$, $a = \xi (4\pi\mu)^{-2} X^{-1} \sum_{j=1}^n d_j^{-4}$, $b = (2\pi\mu X)^{-1} \sum_{j=1}^n (l_j d_j^{-4})$, $c = -(P_n^2 - P_0^2) = -(\Delta_{P_{n0}}^2 + 2P_0 \Delta_{P_{n0}})$;

$\Delta_{P_{n0}} = P_n - P_0$; $i=1, \dots, n-1$.

Дослідженнями встановлено, що залежність міждросельних тисків P_i від зміни вхідного тиску P_n як для багатоелементного, так і двоелементного подільників в загальному є нелінійною, що унеможливило пропорційну зміну перепадів тисків подільника. Тому актуальною є побудова подільників, які забезпечують лінійну (пропорційну) зміну всіх міждросельних тисків.

4. 4. 3. Лінійний подільник тиску

Одним із важливих принципів побудови газодинамічних систем синтезу сумішей, зокрема з мікроконцентраціями компонентів, є необхідність пропорційної зміни тисків на входах і виходах їх дозуючих капілярів, що забезпечує високу точність підтримання концентрації компонентів продукованих сумішей [9].

Як правило для підтримання постійних тисків на дозуючих дроселях синтезаторів застосовують окремі стабілізатори. Проте під час роботи синтезатора тиски не є строго постійними, а під дією різних факторів змінюються (нестабільність роботи стабілізатора, неідентичність характеристик стабілізаторів тощо). При цьому такі впливи є різними для різних типів та екземплярів стабілізаторів і умов їх роботи, що не може забезпечити постійного співвідношення витрат компонентів в синтезаторах.

Для усунення вказаних недоліків нами запропоновано для задання тисків на кінцях дозуючих капілярів

змішувачів газодинамічних синтезаторів застосувати подільники тиску, що забезпечують задання різних перепадів тисків на дозуючих капілярах від окремої лінії, режим роботи якої є незмінним [9]. Окрім того, суттєвою перевагою подільників є те, що зміна тиску на його вході спричиняє однонапрявленість зміни всіх міждросельних тисків, а для лінійного подільника – ще і їх пропорційний приріст і відповідно лінійні зміни перепадів тисків на дозуючих капілярах змішувача синтезатора. Така зміна тисків на дозуючих капілярах, які мають лінійні або однакової кривизни VX , призводить до пропорційної зміни витрат дозованих компонентів при їх незмінних концентраціях в одержуваній газовій суміші.

Система рівнянь, за допомогою якої визначають розміри прохідних каналів усіх капілярів лінійного подільника із заданими значеннями міждросельних тисків (коефіцієнтів поділу) має вигляд [9]

$$\left. \begin{aligned} d_j &= d_{(j-1)} / g_j, \\ l_j &= l_{(j-1)} / y_j, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

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

$y_j = D_{(j-1)} + 1$; $D_{(j-1)} = D_{j-1} / D_j$; $D_{j-1} = \Delta_p / \Delta_{P_{j-1}} = 1 / k_{j-1}$;

$\Delta_{P_{j-1}} = P_{j-1} - P_0$; $\kappa = P_0 \sqrt{\xi X}$.

Залежність (13) одержана на основі заміщення послідовного з'єднання капілярів з лінійними витратними характеристиками еквівалентним капіляром.

5. Корисні поєднання базових схем

Крім розглянутих вище базових схем у дросельних системах можуть бути окремо виділені їх поєднання, які представляють собою складені схеми спеціального функціонального призначення. До таких схем можна віднести пакетні суматори, пакетні подільники тисків та потоків, а також каскадні з'єднання подільників тиску і каскадні з'єднання подільників тиску і потоків. Застосування таких складених схем може забезпечити суттєве поліпшення властивостей дросельних систем і пристроїв.

5. 1. Каскадне з'єднання подільників тиску

Приготування газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів за допомогою газодинамічних систем синтезу згідно із розробленою нами концепцією потребує задання суттєво різних (до трьох порядків) перепадів тисків на дозуючих капілярах. З цією метою для збільшення значення коефіцієнта χ нами запропоновано застосовувати каскадне з'єднання подільників тисків [9]. У такому з'єднанні (рис. 4) реалізують поділ наступним подільником перепаду тиску на останньому капілярі попереднього подільника. Відтворення тисків на входах відповідних подільників здійснюють за допомогою повторювачів тиску $\Pi\Pi_2, \dots, \Pi\Pi_K$.

Застосування в такому з'єднанні багатоелементних лінійних подільників забезпечує необхідну кількість суттєво різних міждросельних тисків (перепадів тисків), які при зміні вхідного тиску P_n набувають пропорційних однонаправлених приростів.

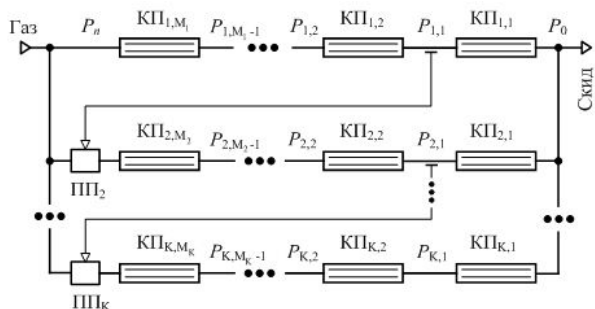


Рис. 4. Принципова схема каскадного з'єднання подільників тиску: ПП_к – повторювач тиску на вході k-го подільника; КП_{к, m} і P_{к, m} – m-й капіляр k-го подільника і тиск на вході цього капіляра

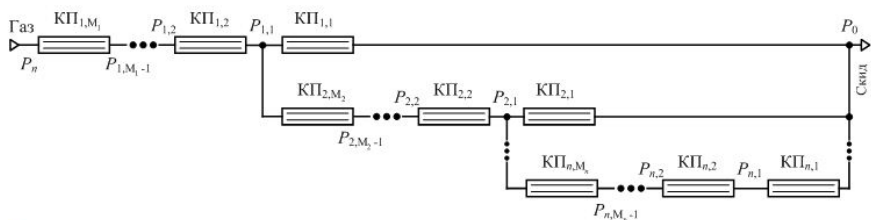


Рис. 5. Принципова схема капілярного ПТП

Розроблені для задання перепадів тисків на кінцях дозуючих капілярів синтезаторів блоки стабілізованих тисків на основі каскадного з'єднання K лінійних подільників тиску можуть забезпечити значення χ на рівні 30K.

5. 2. Каскадне з'єднання подільників тиску і потоків

Для забезпечення співвідношення перепадів тисків на рівні кількох порядків, окрім каскадного з'єднання подільників тисків, можна застосувати і схему, одержану поєднанням подільників тисків і потоків (ПТП), яка представлена на рис. 5.

У загальному принципова схема такого з'єднання складається з n каскадів (i=1,...,n) багатоелементних (j=1,...,M_i) подільників тисків, вхід кожного з яких, починаючи з другого, під'єднаний до міждросельної камери, утвореної першим і другим капілярами (КП_{i,1} і КП_{i,2}) попереднього подільника. Тиски на виході всіх подільників є постійними і рівними P₀. Окрім цього кожен подільник тисків є однією з n галузок подільника потоків.

Розрахунок і моделювання ПТП можна виконати з використанням еквівалентних перетворень базових з'єднань, які розглянуті вище.

Застосування такого з'єднання капілярних ПТП для побудови блоку стабілізованих тисків дає можливість підвищити точність поділу тисків, а одже і поліпшення його метрологічних та експлуатаційних характеристик.

6. Приклад синтезатора на основі оптимального поєднання базових дросельних схем

Аналіз базових дросельних схем дав можливість розвинути газодинамічну систему синтезу складних газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів, точність задання і підтримання концентрацій якої є на порядок вищою, ніж у відомих [7, 9].

На рис. 6 представлена узагальнена схема газодинамічного синтезатора сумішей на основі поєднання змішувача Зм газових потоків і блоку стабілізованих тисків живлення БСТ.

Забезпечення високих метрологічних і експлуатаційних характеристик розробленої газодинамічної системи синтезу сумішей стало можливим, зокрема завдяки застосуванню в принциповій схемі синтезатора суматора потоків, в каналах якого встановлені змінні пакети лінійних капілярів, а також заданню тисків на їх входах від БСТ, побудованого на основі каскадного з'єднання лінійних подільників тисків. Можливі зміни як тиску живлення БСТ, так і компонентів газової суміші на входах дозуючих капілярів компенсуються завдяки виконанню як дозуючих капілярів змішувача, так і капілярів подільників тисків БСТ з лінійними ВХ. Моделюванням систем синтезу газових сумішей встановлено, що похибка задання концентрації компонентів (в діапазоні мікроконцентрацій) не перевищує 0,5 %, а підтримання –

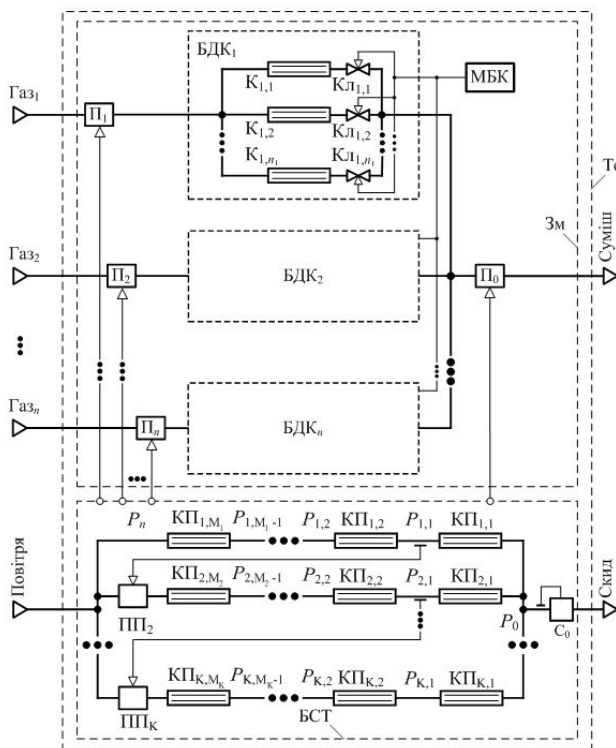


Рис. 6. Принципова схема газодинамічного синтезатора для приготування n-компонентних сумішей з мікроконцентраціями компонентів: Зм – змішувач газових потоків (суматор дозованих потоків); БДК_i – блок дозуючих капілярів в каналі i-го компонента суміші (i=1,...,n) (пакет змінного опору); K_{i, j} – j-й дозуючий капіляр (j=1,...,n_i) i-го компонента; П₀,...,П_n – повторювачі тиску Зм; БСТ – блок стабілізованих тисків (каскадне з'єднання подільників тисків); ПП₂,...,ПП_к – повторювачі тиску БСТ; КП_{i, j} – j-й капіляр (j=1,...,M_i) i-го подільника тиску (i=1,...,K); C₀ – стабілізатор абсолютного тиску; МБК – мікроконтрольний блок керування; Тс – термостат

0,05 %, що є на порядок меншою, ніж у відомих газодинамічних синтезаторів.

7. Висновок

Досліджені і представлені базові з'єднання дросельних елементів, які знаходять застосування при побудові газодинамічних засобів, зокрема газодинамічних синтезаторів, задавачів витрати, блоків стабілізованих тисків.

Представлені математичні залежності забезпечують моделювання і оптимізацію газодинамічних систем для різних режимів роботи. Показано, що залежно від вимог, які висувають до газодинамічних

систем синтезу (склад синтезованих сумішей, концентрації компонентів, значення витрати суміші на виході синтезатора, необхідність компенсації факторів впливу тощо) їх схеми доцільно будувати на основі оптимального поєднання базових дросельних з'єднань.

Так, наприклад, для побудови синтезатора складних багатокомпонентних сумішей з мікроконцентраціями окремих компонентів доцільно використовувати зокрема схеми пакетного суматора потоків компонентів, лінійного каскадного подільника тисків.

Точність задання і підтримання концентрації компонентів сумішей, одержуваних такими синтезаторами, є на порядок вищою, ніж у відомих.

Література

1. Рейман, Л. В. Техника микродозирования газов. (Методы и средства для получения газовых смесей): справочное пособие [Текст] / Л. В. Рейман. – Л.: Химия, 1985. – 224 с.
2. Nelson, G. O. Gas mixtures: preparation and control [Text] / G. O. Nelson. – Lewis Publishers, 1992. – 294 p.
3. Бондаренко, В. Л. Методы приготовления смесей на основе инертных газов [Текст] / В. Л. Бондаренко, Н. П. Лосяков, Ю. М. Симоненко, О. В. Дьяченко, Т. В. Дьяченко // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2012. – Спец.вып. №8. – С. 41–53.
4. Helwig, N. Gas mixing apparatus for automated gas sensor characterization. [Text] / N. Helwig, M. Schuler, C. Bur, A. Schutze // Measurement Science and Technology. – 2014. – Vol. 25, Issue 5. doi: 10.1088/0957-0233/25/5/055903
5. Герасимов, А. П. Микросопловый компаратор для калибровки (поверки) критических микросопел [Текст] / А. П. Герасимов, А. В. Красавин, И. А. Быков // Измерительная техника. – 2014. – № 3. – С. 41–44.
6. Demichelis, A. Metrological performances of mass flow controllers for dynamic gas dilution [Text] / A. Demichelis, G. Sassi, M. P. Sassi // 20th IMEKO World Congress 2012. Busan, Republic of Korea. – 2012. – Vol. 1. – P. 1014–1017.
7. Теплюх, З. М. Принципи побудови високоточних дросельних синтезаторів газових сумішей [Текст] / З. М. Теплюх // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Автоматика, вимірювання та керування». – 2006. – № 551. – С. 87–94.
8. Кремлевский, П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ: справочник: Кн.1. [Текст] / П. П. Кремлевский. – СПб.: Политехника, 2002. – 409 с.
9. Ділай, І. Основи побудови дросельних синтезаторів газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів [Текст] / І. Ділай // Вісник Тернопільського НТУ. – 2013. – № 2. – С. 164–172. – Режим доступу: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/2783>
10. Ділай, І. В. Моделювання паралельного з'єднання дросельних елементів [Текст] / І. В. Ділай // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Теплоенергетика. Інженерія довіділля. Автоматизація». – 2013. – № 758. – С. 192–198.