

## МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАЛЕЛЬНОГО З’ЄДНАННЯ ДРОСЕЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

© Ділай І.В., 2013

Досліджено паралельне з’єднання капілярних дроселів (пакета капілярів) і розроблено способи заміщення пакета еквівалентним капіляром для моделювання дросельних схем. Виокремлено перспективні для застосування у газодинамічних пристроях пакети, капіляри яких мають рівні або кратні газодинамічні опори та лінійні витратні характеристики.

**Ключові слова:** дросель, еквівалентний капіляр, моделювання, газодинамічні опори.

The parallel junction of capillary throttles (package of capillaries) is investigated and the ways of replacement of the package by an equivalent capillary is developed for modeling the throttle diagrams. The appropriate packages for application in gas-dynamical diagrams are defined. The capillaries of these appropriate packages are of equivalent or multiple gas-dynamical resistance and linear flow characteristics.

**Key words:** throttle, equivalent capillary, modeling, gas-dynamic resistance.

### Постановка задачі

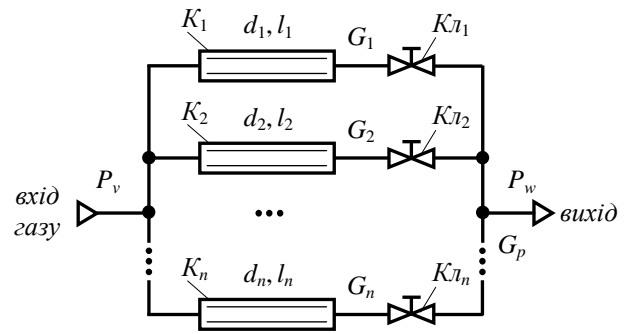
Метрологічне забезпечення і лабораторні дослідження газоаналітичної техніки часто потребують використання різноманітних газодинамічних засобів, зокрема змішувачів для приготування зразкових газових сумішей різного складу, задавачів витрат і тисків живлення газових потоків [1–4]. Побудова таких газодинамічних пристроїв потребує застосування типових з’єднань дроселів, зокрема, паралельного та послідовного. Так, паралельне з’єднання дроселів (насамперед капілярів, як найперспективніших дозуючих елементів [5]) часто використовують у газодинамічних змішувачах для приготування газових сумішей із різними концентраціями компонентів. Таке з’єднання оформляють у вигляді пакета з одним спільним входом газового потоку та спільним виходом, а для залучення потрібних капілярів пакета на виході кожного з них встановлюють двопозиційний клапан. Моделювання і розрахунок схеми з паралельним з’єднанням часто потребують заміщення пакета капілярів одним еквівалентним капіляром.

*Аналіз останніх досліджень та публікацій.* Відомі математичні моделі дросельних схем (зокрема, послідовного з’єднання капілярів), які використовують поняття еквівалентного дроселя для заміщення лінійного подільника тиску [4]. Що ж стосується паралельного з’єднання, то з доступної нам літератури невідомо про його дослідження і застосування до нього поняття еквівалентного дроселя, хоча питання заміщення паралельного з’єднання еквівалентним капіляром як при постійному перепаді тиску (у межах похибки стабілізації тиску типовими засобами), так і в широкому діапазоні зміни перепаду тисків, становлять теоретичний і практичний інтерес.

*Метою роботи є* побудова та аналіз моделей еквівалентного капіляра, який заміщує паралельне з’єднання капілярів для моделювання та розрахунку газодинамічних засобів контролю і керування.

Досліджуване з’єднання (див.рис.1) у схемах пристроїв може працювати у двох режимах – при *постійному* перепаді тиску (чи невеликих змінах в його околі) та *змінному* (в широкому діапазоні зміни тисків). Заміщення паралельного з’єднання капілярів одним еквівалентним для кожного з цих режимів має свої особливості.

Рис. 1. Схема паралельного з'єднання (пакета) капілярів з клапанами  $K_1, \dots, K_n$  на виході капілярів  $K_1, \dots, K_n$ , які задають витрати  $G_1, \dots, G_n$  газу



### Моделювання паралельного з'єднання капілярів при постійному перепаді тисків

Для цього режиму побудова еквівалентного капіляра полягає у визначенні одного з двох його розмірів (довжини  $l$  чи діаметра  $d$ ) прохідного каналу через заданий другий розмір (зазвичай із конструктивних обмежень) з математичної моделі статички капіляра [5]:

$$G = A \left[ \sqrt{1 + Z} - 1 \right], \quad (1)$$

де  $G$  – масова витрата газу через капіляр;  $A = a \cdot l = (4\pi \mu / \xi) \cdot l$  – коефіцієнт витрати;  $Z = Y \cdot B$  – комплекс розмірів прохідного каналу і параметрів стану газу;  $Y = K \cdot X$  – комплекс розмірів каналу, параметрів виду газу і температури;  $B = P_v^2 - P_w^2 = \Delta_p (\Delta_p + 2P_w)$  – комплекс тисків;  $P_v, P_w$  – абсолютні тиски відповідно на вході та виході капіляра;  $\Delta_p$  – перепад тисків на капілярі;  $K = \xi d^4 / l^2$  – конструктивний комплекс;  $X = (512 R_e T \mu^2)^{-1}$  – параметричний комплекс газу;  $R_e = R_\mu / M$  – газова стала;  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості газу за температури  $T$ ;  $\xi$  – коефіцієнт кінцевих ефектів;  $R_\mu$  – універсальна газова стала;  $M$  – молекулярна маса газу.

Витрату  $G_p$  газу через пакет  $n$  паралельно з'єднаних капілярів із конструктивними розмірами прохідних каналів –  $d_1$  і  $l_1, d_2$  і  $l_2, \dots, d_n$  і  $l_n$  визначають згідно з (1) як суму витрат через кожен капіляр для заданого  $\Delta_p$ , тобто

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

Значення  $\Delta_p$  вибирають із умов роботи пакета у схемі пристрою.

Тоді за відомої витрати  $G_p$  і вибраного значення діаметра  $d_e$  прохідного каналу капіляра, який заміняє пакет, із залежностей (1) і (2) одержують вираз для його довжини  $l_e$  при тому ж заданому  $\Delta_p$

$$l_e = 0,5 \left( \xi a d_e^4 X B G_p^{-1} - a^{-1} G_p \right). \quad (3)$$

У разі задання довжини  $l_e$  каналу капіляра із (1) і (2) аналогічно отримують вираз для його діаметра  $d_e$  із залежності

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

Таким чином одержують еквівалентний капіляр, який дає ту ж витрату  $G_p$ , що і пакет при заданому значенні  $\Delta_p$ . Однак, оскільки реально підтримувати значення  $\Delta_p$  можна тільки з певною похибкою (наприклад, у разі застосування відомих стабілізаторів типу СДГ [6], гранична абсолютна похибка підтримання тиску  $\epsilon$  на рівні  $\pm 1,0$  кПа), то для оцінки адекватності заміщення пакета еквівалентним капіляром потрібно порівняти їхні витратні характеристики (ВХ). Крім того, доцільно дослідити адекватність еквівалентного капіляра в ширшому діапазоні зміни  $\Delta_p$ .

Для всіх нижчезрозглянутих варіантів пакетів, які містять по три капіляри, дозованим газом є азот за температури  $T = 300$  К і абсолютного тиску  $P_w = 100$  кПа на виході. Всі геометричні розміри прохідних каналів капілярів подані у міліметрах і забезпечують ламінарний режим протікання газу ( $Re < 2320, Re = 4G / (\pi \mu d)$ ) у заданому діапазоні зміни  $\Delta_p$ .

На рис. 2а наведені ВХ: 1-3 – відповідних капілярів ( $d_1 = 0,24, l_1 = 20; d_2 = 0,15, l_2 = 50; d_3 = 0,16, l_3 = 120$ ) пакета; 4 – пакета з трьома задіяними капілярами; 5 – еквівалентного капіляра ( $d_e = 0,254, l_e = 12,2$ ), розрахованого за залежністю (3) чи (4) для  $\Delta_p = 50$  кПа. Рис. 2а відображає

загальний випадок, коли капіляри пакета відрізняються як за пропускну здатністю, так і за характером ВХ (кривизною). У зв'язку з тим, що з ВХ, поданих в абсолютних одиницях, не завжди видно їх характер (кривизну) (див. рис. 2а), доцільним є їх подання в безрозмірних величинах (як відношення проміжних значень витрати  $G$  через кожен з елементів до її максимального значення  $G_{max}$ ). На рис. 2б показані витратні характеристики кожного окремого капіляра, пакета та еквівалентного капіляра, з яких чітко видно, що ВХ відповідного окремого капіляра 1, пакета і еквівалентного капіляра мають від'ємну кривизну, а ВХ капілярів 2 і 3 пакета – додатну.

Як видно з рис. 2а витрати пакета і еквівалентного капіляра є рівними при  $\Delta p = 50$  кПа, для якого розрахований еквівалентний капіляр, а для інших значень перепаду – різними. Відносне розходження  $\delta = (G_p - G_e) / G_p$  витрат пакета та одержаного за залежністю (3) чи (4) еквівалентного капіляра (крива 1) у широкому діапазоні зміни перепаду тиску показано на рис. 3а, з якого видно, що розходження зростає при збільшенні відхилення  $\Delta p$  від того значення, для якого розрахований еквівалентний капіляр і може становити десятки %. Отже, таким способом одержаний еквівалентний капіляр в загальному не може замінити пакет у широкому діапазоні зміни  $\Delta p$ .

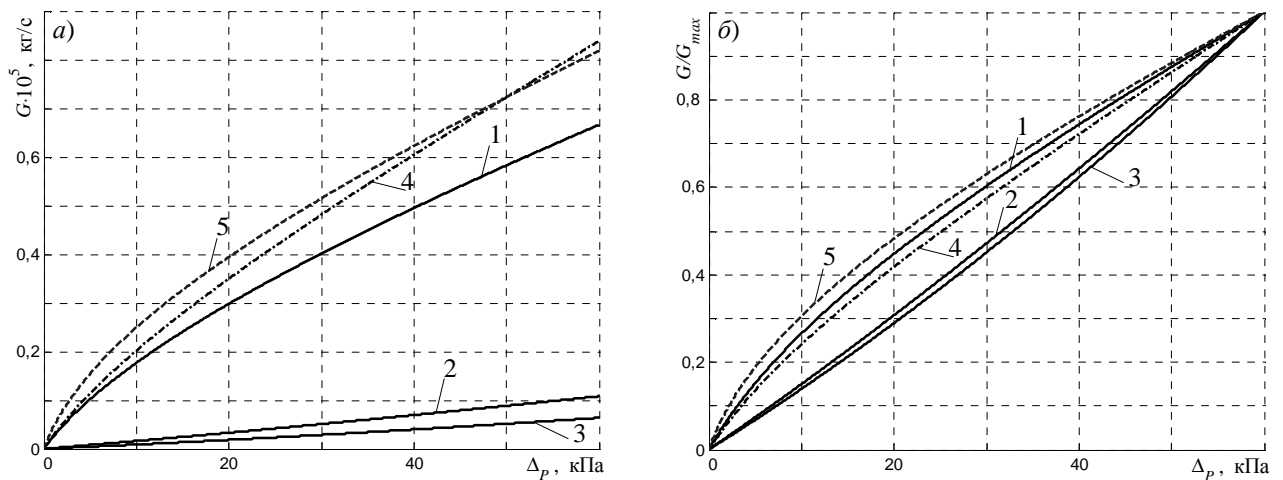


Рис. 2. Витратні характеристики в абсолютних а) і відносних б) одиницях:

1-3 – окремих капілярів; 4 – пакета; 5 – еквівалентного капіляра

На рис. 3б наведений графік розходження  $\delta$  у вузькому діапазоні  $\Delta p$  у разі застосування стабілізаторів тиску, з якого видно, що при зміні тиску на рівні  $\pm 1,0$  кПа розходження  $\delta$  становить близько 0,3 %. Такі розходження в окремих випадках є допустимими, проте для високоточних газодинамічних пристроїв можуть впливати на остаточний результат моделювання.

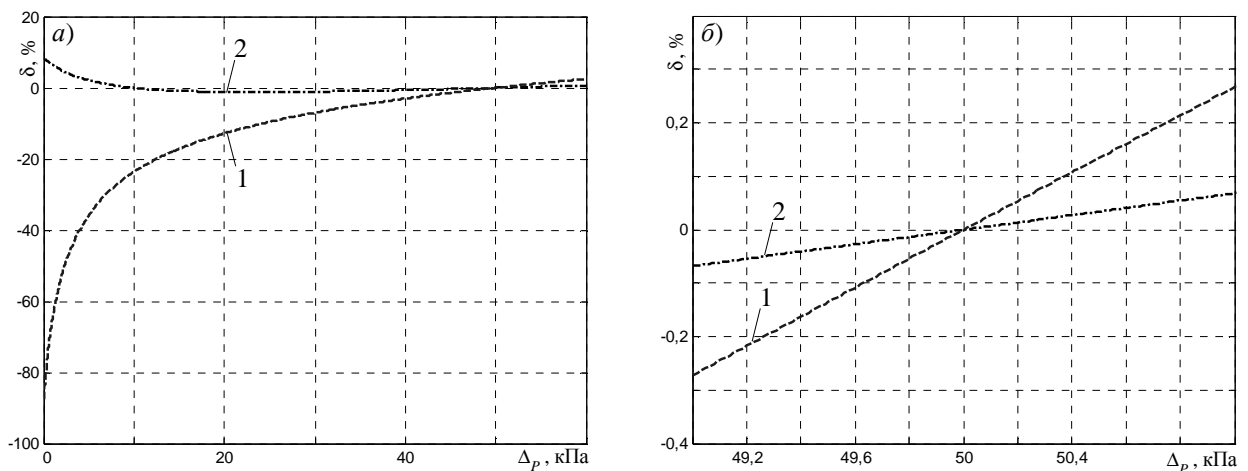


Рис. 3. Відносні розходження  $\delta$  для еквівалентних капілярів, розрахованих відповідно за залежностями (3) чи (4) – крива 1 і (7) – крива 2: а) для широкого діапазону зміни  $\Delta p$ ; б) в околі перепаду тиску  $\Delta p = 50$  кПа

Отже, розглянутий спосіб побудови еквівалентного капіляра за залежністю (3) або (4) для заміщення пакета дроселів, який працює при постійному перепаді тиску (в межах похибки стабілізації тиску відомих засобів), не завжди може бути застосований у практиці моделювання газодинамічних пристроїв, оскільки розходження витрати при заміщенні пакета еквівалентним капіляром можуть відчутно спотворювати реальні результати, зокрема, значення дозованих капілярами витрат, а отже і концентрацій компонентів у сумішах, отримуваних газодинамічними синтезаторами. Це зв'язано з тим, що один із параметрів еквівалентного капіляра задають довільно (хоча залишаються обмеження стосовно розмірів прохідних каналів і значення критерію Рейнольдса). Застосування цього способу є адекватним для моделювання газодинамічних пристроїв у режимі статички.

### Моделювання паралельного з'єднання капілярів в широкому діапазоні перепаду тисків

Для цього режиму роботи запропонований спосіб заміщення пакета, суть якого полягає в одержанні розмірів ( $d_e$ ,  $l_e$ ) еквівалентного капіляра із системи двох рівнянь, складених 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  $\Delta_{p1}$  і  $\Delta_{p2}$ , що залежать від умов роботи пакета. Ці рівняння мають вигляд

$$G_{pj} = a \sum_{i=1}^n \left\{ l_i \left[ \sqrt{1 + \xi X B_j d_i^4 / l_i^2} - 1 \right] \right\}, \quad j = \overline{1, 2}. \quad (5)$$

З іншого боку, ті ж витрати  $G_{p1}$ ,  $G_{p2}$  через еквівалентний капіляр для тих  $B_1$  і  $B_2$  будуть

$$G_{pj} = a l_e \left[ \sqrt{1 + \xi X B_j d_e^4 / l_e^2} - 1 \right], \quad j = \overline{1, 2}. \quad (6)$$

Тоді з (5) і (6) отримують залежності для визначення розмірів еквівалентного капіляра:

$$d_e^4 = \frac{G_{p1} G_{p2} (G_{p2} - G_{p1})}{\xi a^2 X (G_{p1} B_2 - G_{p2} B_1)}; \quad l_e = \frac{G_{p2}^2 B_1 - G_{p1}^2 B_2}{2a (G_{p1} B_2 - G_{p2} B_1)}. \quad (7)$$

Отже, для визначення розмірів прохідного каналу еквівалентного капіляра потрібно за допомогою залежності (5) визначити витрати  $G_{p1}$  і  $G_{p2}$  через пакет відповідно для двох різних перепадів тисків  $\Delta_{p1}$  і  $\Delta_{p2}$ , а відтак підставивши отримані  $G_{p1}$ ,  $G_{p2}$  у (7) визначити  $d_e$  і  $l_e$ .

Прикладом застосування такого способу заміщення є еквівалентний капіляр ( $d_e = 0,277$ ,  $l_e = 35,71$ ), розрахований за (7) для перепадів тиску 10 і 50 кПа, для вищезгаданого пакета. На рис. 2 ВХ так одержаного еквівалентного дроселя не наведена, оскільки вона практично збігається з ВХ пакета.

Як видно з графіків на рис. 3 відносне розходження витрати через еквівалентний капіляр, одержаний за (3) або (4) (крива 1) є у декілька разів більшим від того, яке дає еквівалентний капіляр (крива 2), одержаний за (7). Ще однією перевагою другого способу заміщення є те, що завдяки можливості вибору обох перепадів тиску  $\Delta_{p1}$  і  $\Delta_{p2}$  можна мінімізувати розходження  $\delta$  витрат (див. рис. 3а).

Отже, заміщення пакета еквівалентним капіляром, одержаним згідно із (7), гарантує можливість якісного моделювання у широкому діапазоні перепаду тиску.

Далі доцільно детальніше розглянути перспективні для застосування (зокрема у блоках живлення і синтезаторах газових сумішей) пакети капілярів і відповідні характеристики еквівалентних капілярів.

### Аналіз перспективних пакетів газодинамічних засобів

*Варіант 1.* Якщо пакет складений з  $n$  ідентичних капілярів (однакові геометричні розміри прохідних каналів – всі капіляри однакового опору (провідності)), то залежність (5) спрощується до виразу

$$G_{pj} = n A \left[ \sqrt{1 + Y B_j} - 1 \right], \quad j = \overline{1, 2}, \quad (8)$$

а розміри еквівалентного капіляра визначають, як зазначено вище, згідно з (7).

На рис. 4а наведені ВХ двох пакетів, причому ВХ капілярів першого пакета з розмірами прохідних каналів  $d = 0,2$ ,  $l = 130$  мають додатну, а ВХ капілярів другого пакета ( $d = 0,2$ ,  $l = 30$ ) – від'ємну кривизну. Як видно з рис. 4б і встановлено моделюванням, витратні характеристики кожного капіляра, відповідного пакета і еквівалентного дроселя, подані у відносних величинах, повністю збігаються у всьому діапазоні перепаду тисків.

*Варіант 2.* Пакет утворений  $n$  капілярами, провідності яких кратні базовій з коефіцієнтами, які є елементами ряду  $\{2^{i-1}\}_{i=1}^n$ . У цьому разі залежність (2) набуває вигляду

$$G_{pj} = (2^n - 1) A_1 \left[ \sqrt{1 + Y_1 B_j} - 1 \right], \quad j = \overline{1, 2}, \quad (9)$$

де  $A_1 = a \cdot l_1$  і  $Y_1 = K_1 X$  – відповідно коефіцієнт витрати і комплекс капіляра, взятого за базовий.

Геометричні розміри таких капілярів можна одержати так:

– задають розміри базового капіляра –  $d_1$  і  $l_1$ ;

– з системи рівнянь

$$2^{i-1} A_1 \left[ \sqrt{1 + Y_1 B_j} - 1 \right] = A_i \left[ \sqrt{1 + Y_i B_j} - 1 \right], \quad i = \overline{2, n}; \quad j = \overline{1, 2}$$

визначають розміри решти кратних за провідністю капілярів ( $d_2, l_2; \dots; d_n, l_n$ ).

Застосування залежностей (7) до такого пакета, тобто розв'язування рівнянь (7) і (9) як системи, забезпечує можливість побудови адекватного еквівалентного капіляра у широкому діапазоні перепаду тисків для довільного характеру ВХ базового капіляра. При цьому всі капіляри пакета і еквівалентного дроселя мають однаковий характер кривизни ВХ.

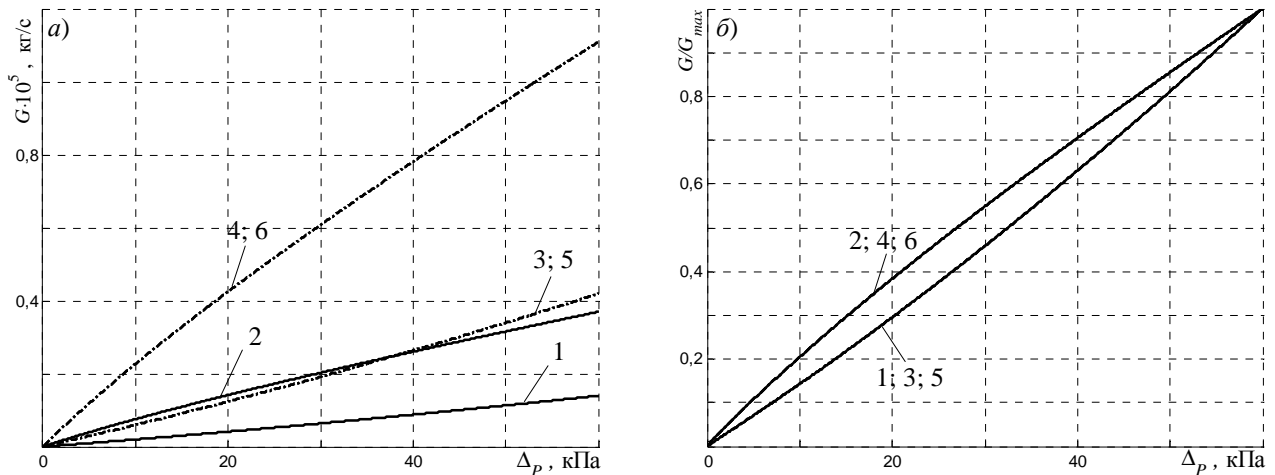


Рис. 4. Витратні характеристики в абсолютних а) і відносних б) одиницях:

1, 2 – окремих рівноопорних капілярів двох різних розмірів (різної кривизни); 3, 4 – пакетів капілярів різної кривизни; 5 і 6 – еквівалентних капілярів

Як приклад на рис. 5а показані ВХ окремих капілярів пакета, коефіцієнти провідності яких кратні 1, 2 і 4 ( $d_1 = 0,08, l_1 = 40; d_2 = 0,113, l_2 = 80; d_3 = 0,16, l_3 = 160$ ), пакета загалом і еквівалентного капіляра, розрахованого за (7) для двох  $\Delta p$  (10 і 50 кПа), розміри прохідного каналу якого становлять  $d_e = 0,212$  і  $l_e = 280$ . Із цих графіків видно, що всі вони мають додатну кривизну і що ВХ пакета і еквівалентного капіляра повністю збігаються у всьому діапазоні перепаду тисків.

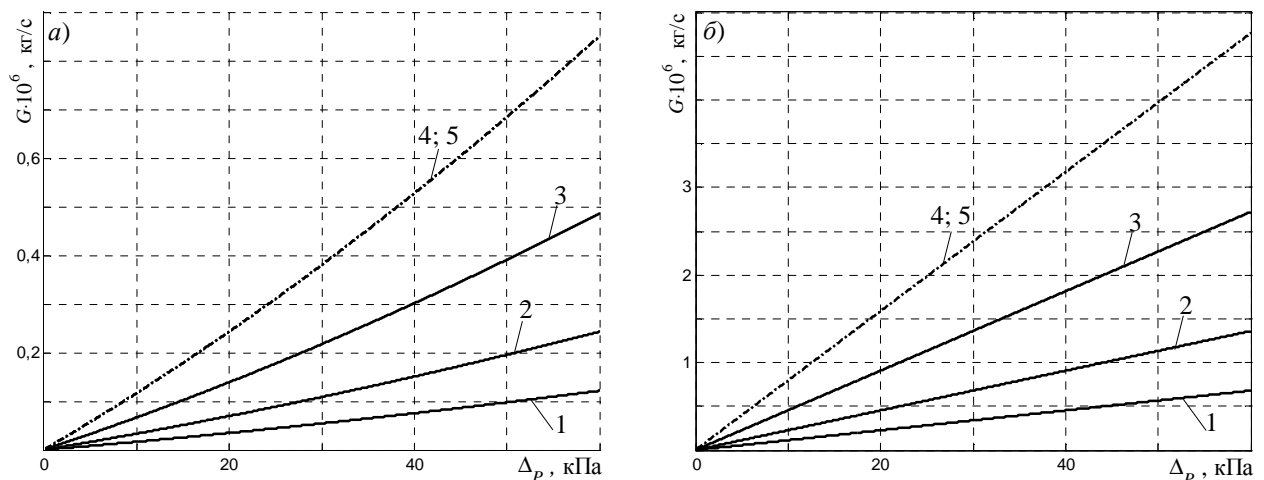


Рис. 5. Витратні характеристики нелінійних а) і лінійних б) капілярів з кратними провідностями:

1-3 – окремих капілярів пакета; 4, 5 – пакета і еквівалентного капіляра

Для розглянутих варіантів 1 і 2 заміщення пакета еквівалентним капіляром, розрахованим за (3), не гарантує повної збіжності його витратних характеристик і пакета у широкому діапазоні перепаду тисків, оскільки цей спосіб заміщення передбачає довільне задання, обмежене лише конструктивними вимогами до капіляра та критерієм Рейнольдса, одного із розмірів прохідного каналу еквівалентного капіляра. У зв'язку з цим застосування цього способу тут детальніше не розглянуте.

*Варіант 3.* Пакет на основі капілярів з лінійними ВХ (далі – лінійні капіляри), розміри ( $d$  і  $l$ ) прохідних каналів яких зв'язані функціональним співвідношенням [5]

$$Y \cdot P_w^2 = 1. \quad (10)$$

Для того, щоби визначити геометричні розміри лінійного капіляра необхідно, враховуючи умови його застосування, задати один з них (або  $l$ , або  $d$ ) і з (10) визначити інший. Якщо задати довжину  $l$  лінійного капіляра, то із співвідношення (10) залежність для визначення його діаметра  $d$  можна подати у вигляді

$$d = \left[ l / \sqrt{\xi X} / P_w \right]^{0.5}. \quad (11)$$

Після підстановки виразу (11) в (1) одержують залежність для визначення витрати  $G_{(l)}$  через лінійний капіляр заданої довжини  $l$

$$G_{(l)} = k_{(l)} l, \quad (12)$$

де  $k_{(l)} = a \Delta_p P_w^{-1}$ .

З врахуванням (12) залежність для визначення витрати через пакет з  $n$  капілярів, кожен з яких має свою довжину  $l_i$  (в загальному  $l_1 \neq l_2 \neq \dots \neq l_n$ ), набуває вигляду:

$$G_{(l)} = k_{(l)} \sum_{i=1}^n l_i, \quad (13)$$

а залежність для витрати через еквівалентний капіляр заданої довжини  $l_e$  (в загальному довільної, тобто  $l_e \neq l_1 \neq l_2 \neq \dots \neq l_n$ ) –

$$G_{(l)} = k_{(l)} l_e. \quad (14)$$

Як видно з (13) і (14) еквівалентний капіляр у такому разі матиме довжину, що дорівнює  $l_e$

$$l_e = \sum_{i=1}^n l_i. \quad (15)$$

Якщо ж задати діаметр  $d$  лінійного капіляра, то із співвідношення (10) залежність для визначення його довжини  $l$  можна записати так:

$$l = d^2 \sqrt{\xi X} P_w. \quad (16)$$

Тоді за аналогією можна одержати залежності для витрати  $G_{(d)}$  через:

– окремий лінійний капіляр заданого діаметра  $d$

$$G_{(d)} = k_{(d)} d^2, \quad (17)$$

де  $k_{(d)} = 4\pi\mu\sqrt{\xi^{-1} X} \Delta_p$ ;

– пакет з  $n$  лінійних капілярів, в загальному кожен діаметр  $d_i$  ( $d_1 \neq d_2 \neq \dots \neq d_n$ )

$$G_{(d)} = k_{(d)} \sum_{i=1}^n d_i^2, \quad (18)$$

– еквівалентний капіляр заданого діаметра  $d_e$  (в загальному довільного, тобто  $d_e \neq d_i$ ) –

$$G_{(d)} = k_{(d)} d_e^2. \quad (19)$$

З наведеного випливає, що еквівалентний капіляр у такому разі матиме заданий діаметр  $d_e$ , а довжина  $l_e$  визначається залежністю

$$d_e = \left[ \sum_{i=1}^n d_i^2 \right]^{0.5}. \quad (20)$$

Особливістю заміни пакета лінійних капілярів еквівалентним капіляром є те, що достатньо задавати одну витрату через пакет за одного перепаду тисків  $\Delta_p$ .

Окремо варто розглянути застосування в пакеті лінійних капілярів: а) однакої конструкції; б) з кратними  $\{2^{i-1}\}_{i=1}^n$  провідностями.

У разі побудови пакета із  $n$  капілярів однакої конструкції ( $d_0, l_0$ ) розміри прохідного каналу еквівалентного лінійного капіляра визначають як

$$d_e = \sqrt{n} d_0; l_e = n l_0. \quad (21)$$

Якщо ж пакет містить  $n$  лінійних капілярів з кратними провідностями, то розміри еквівалентного лінійного капіляра визначають згідно із залежностями

$$d_e = [2^n - 1]^{0.5} d_1; l_e = [2^n - 1] l_1, \quad (22)$$

де  $d_1, l_1$  – довжина та діаметр першого лінійного капіляра, взятого за базовий.

На рис.5б наведені ВХ: лінійних капілярів ( $d_1=0,1, l_1=13,7; d_2=0,141, l_2=27,3; d_3=0,2, l_3=54,6$ ), еквівалентного лінійного капіляра ( $d_e=0,265, l_e=95,6$ ) та пакета, розраховані за залежностями (11)-(22). Оскільки ВХ капілярів є лінійними, то ВХ пакета і відповідного еквівалентного капіляра є лінійними і збігаються.

Вищерозглянуті варіанти пакетів капілярів є перспективними, зокрема, для побудови блоків живлення (на основі подільників тисків і потоків газу) і змішувачів – двох основних складових газодинамічних синтезаторів багатокомпонентних газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів [4].

### Висновки

Запропоновані та досліджені два способи заміщення паралельного з'єднання капілярів, ефективно застосування кожного з яких визначене режимом роботи газодинамічних пристроїв.

Перший з розглянутих способів доцільно застосовувати у разі моделювання газодинамічних схем у режимі статички, оскільки тоді він забезпечує еквівалентне заміщення пакета. Визначення розмірів еквівалентного капіляра в цьому разі здійснюють за однією точкою перепаду тиску. Застосування цього варіанта заміщення для широкого діапазону зміни перепаду тисків на пакеті не гарантує задовільних результатів, оскільки при цьому можуть виникати розходження на рівні десятків відсотків.

Другий спосіб заміщення вимагає використання двох точок перепаду тисків і забезпечує якісні результати в режимі зміни перепаду тисків у широкому діапазоні. Окрім того, він дає можливість здійснювати еквівалентну заміну пакетів, які містять капіляри з: однаковими розмірами прохідних каналів; кратними провідностями; лінійними капілярами.

1. Теплох З.Н., Ділай І.В. Задатчик расхода газа-носителя в хроматографе // Датчики и системы. №2, 2012. – С. 41–44.
2. Патент Великобританії № 2136703. Mixing of gaseous substances / G.F.Gorin, A.Barcellona, A.Lausarot / Feb. 23, 1983.
3. United States Patent № 4915123. Int. Cl.<sup>4</sup> G01D 11/03; U.S. Cl. 137/599. Apparatus for prepa-ring gas mixtures from constituents taken in a given proportion / G.A.Morgovsky, E.P.Pistun, Z.N.Tepljykh, Y.L.Sankin. – Appl. No.: 189,471; Filed: May 2, 1988. Date of Patent: Apr. 10, 1990.
4. Ділай І.В., Теплох З.М. Побудова подільників тиску для живлення газодинамічних дросельних синтезаторів // Вісник Нац. Ун-ту “Львівська політехніка” №659, “Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація”. – Львів, 2009. – С. 120–128.
5. Теплох З.М. Принципи побудови високоточних дросельних синтезаторів газових сумішей // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” №551, “Автоматика, вимірювання та керування”. – Львів, 2006. – С.87–94.
6. Прохоров В.А. Основы автоматизации аналитического контроля химических производств. – М.: Химия, 1984. – 320 с.