

1. Френкель Б.А. Измерение малых и микрорасходов продуктов нефтехимических производств. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1973. 2. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. – 4-е изд. – Л.: Машиностроение, Ленингр. Отделение, 1989. 3. Теплюх З.М., Парнета О.З. Похибки визначення каліброваного об'єму газу в бюретці плівкового витратоміра // Вісн. НУ “Львівська політехніка”. – 2001. – № 432. – С. 121–125. 4. Теплюх З.М., Парнета О.З. Вимірювальні бюретки плівкових витратомірів газу // Методи та прилади контролю якості. – 2000. – № 6. 5. Френкель Б.А. Измерение расхода жидкостей и газов в малотоннажных производствах и на экспериментальных установках. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1989. 6. Levy A. The accuracy of the bubble meter method for gas flow measurements // J. Scien. Instrum., V.41, 1964. 7. А.с. 1076760 СССР, G01 F15/00. Устройство для измерения малых расходов газа / Пистун Е.П., Стасюк И.Д., Теплюх З.М.. – Заявл. 15.04.82; Оpubл. 28.02.84, Бюл. № 8. 8. Шмулевич Є.А., Большаков Д.А., Чехов Е.Е. Прибор для измерения объемных скоростей газового потока при атмосферном и пониженном давлении // ЖФХ, 1973, Т. 47, № 1, с. 264-265. 9. А.с. 651196 СССР, G01 F3/00. Устройство для измерения расхода газа / В.Г. Березкин, С.В. Мельникова. - № 2537172/18-10; Заявл. 27.10.77; Оpubл. 05.03. 79, Бюл. № 9. – 2с. 10. Пат. 4.914.955 США, G01 F1/708. Soapfilm flowmeter device for measuring gas flow rates / David A. Stonestrom (США). - № 258,955; Заявл. 29.08.88; Оpubл. 10.04.90. – 5 с. 11. Патент 13107 України, G01 F1/70. Плівковий витратомір / А.Ф. Данько, І.С. Ігнашкін. - № 5100024/SU; Заявл. 08.05.91; Оpubл. 28.02.97, Бюл. №1. – 5 с. 12. А.с. 1539535 СССР, G01 F 1/42. Пленочно-пузырьковый расходомер /Н.Д. Дубовой, В.Ф. Илясов, А.Ю. Лукичев. - № 4022615/24-63; Заявл. 14.02.86; Оpubл. 30.01.90, Бюл. № 4. – 3 с. 13. А.с. 1017929 СССР, G01 F 1/70. Пленочный расходомер /В.П. Делямуре, С.А. Сирота. - №2661116/18-10; Заявл. 05.09.78; Оpubл. 15.05.83, Бюл. № 18. – 3 с. 14. Пат. 2 092 742 А Великобританії, G01 P5/18. Bubble flowmeter / Peter Small (Великобританія). - № 8104006; Заявл. 10.02.81; Оpubл. 18.08.82. – 5 с. 15. Пинкава Я. Лабораторная техника непрерывных процессов. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961.

УДК 681.5.017

Євген Пістун, Галина Леськів
 Національний університет “Львівська політехніка”,
 кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів

ГАЗОГІДРОДИНАМІЧНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ НА СКЛАДЕНИХ ДРОСЕЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТАХ

© Пістун Євген, Леськів Галина, 2002

Contains the principles of modelling of gashydrodynamical throttle measuring converters and systems. Generalized models of measuring converters built at one and composite throttle elements are presented.

Газогідродинамічні дросельні вимірювальні перетворювачі будуються на одному чи декількох дросельних елементах, певним чином з'єднаних у відповідну вимірювальну схему [1]. Як дросельні елементи можуть застосовуватись пристрої звуження потоку або трубки різноманітної конфігурації і форми. Найпоширенішими є циліндричні трубки

(капіляри) різної довжини, кільцеві щілини, тонкі діафрагми з отвором, а також сопла і годинникові камені. Дросельні елементи описуються витратною характеристикою, яка показує зв'язок витрати середовища, що протікає через елемент, з тиском до і після елемента, з його конструктивними характеристиками, а також з параметрами середовища.

Функціональні можливості та метрологічні характеристики таких перетворювачів залежать від цілого ряду різноманітних факторів: від кількості дросельних елементів у схемі, від виду рідини (стискувана, нестискувана, ньютонівська, неньютонівська тощо), що протікає через дросельні елементи, від режиму живлення перетворювача (сталий тиск, стала витрата, сталий перепад тиску) та від умов його роботи. Досить важливим тут є також тип вихідного сигналу перетворювача, яким може бути чи тиск, чи перепад тиску, чи витрата. У зв'язку з тим, що кожен із вказаних вище факторів може приймати різні значення чи модифікації, а всі вони разом взяті – зустрічаються в різних комбінаціях, аналіз можливостей і характеристик різних дросельних вимірювальних схем та їх зіставлення, необхідне для побудови конкретного вимірювального перетворювача, є досить складною задачею. Цю задачу можна розв'язати математичним моделюванням дросельних вимірювальних схем і перетворювачів.

Найпростіший вимірювальний перетворювач будується на одному дросельному елементі. Модель такого перетворювача відповідає рівнянню витратної характеристики дросельного елемента, застосованого у схемі, яке в загальному випадку можна зобразити так:

$$Q = f(P_{вх}, P_{вих}, B_k, B_n, B_e), \quad (1)$$

де Q – масова витрата рідини через дросель; $P_{вх}$ і $P_{вих}$ – абсолютні тиски рідини, відповідно, на вході і на виході дроселя; B_k, B_n і B_e – конструктивний, параметричний та емпіричний комплекси, що відповідно визначаються конструкцією дроселя, параметрами рідини, що протікає через дросель, та емпіричними коефіцієнтами, які враховують реальність рідини і термодинамічних процесів її протікання в дросельному елементі.

Комплекс B_k безпосередньо залежить від конструктивних характеристик дроселя. Наприклад, для дросельних елементів, що найбільше застосовуються, ці залежності визначаються: для ламінарного дроселя типу циліндричної трубки – $B_k = f_1(d, l)$, де d і l – діаметр та довжина каналу трубки; для турбулентного дроселя типу циліндричного отвору в тонкій стінці з діаметром d – $B_k = f_1(d)$.

Для витратних характеристик багатьох дросельних елементів функція f_1 може бути виражена в явному вигляді, що дає можливість при моделюванні дросельних схем користуватись лише величиною B_k замість різних конструктивних характеристик дроселя.

Комплекс B_n залежить від параметрів середовища, що протікає через дросель. Залежно від виду цього середовища він визначається як:

- для нестискуваної ньютонівської рідини: $B_n = f_2(\mu, \rho)$,
- для стискуваної ньютонівської рідини (газу): $B_n = f_2(\mu, \rho, \chi)$,
- для неньютонівської в'язко-пластичної рідини: $B_n = f_2(\eta, \tau_0, \rho)$,

де μ і ρ – в'язкість і густина середовища; χ – показник адіабати середовища; η – пластична в'язкість; τ_0 – гранична напруга зсуву.

Вигляд функції f_2 залежить від типу дросельного елемента. Для деяких дроселів функція f_2 також може бути виражена в явному вигляді.

Оскільки розглянуті параметри рідини та конструктивні параметри дроселів залежать від температури, то комплекси B_k і B_n також залежать від температури.

Комплекс B_e відповідно до вищевказаного означення залежить від емпіричних коефіцієнтів, що фігурують у витратних характеристиках дросельних елементів. Так, для ламінарного дроселя типу циліндричної трубки та нестискуваної ньютонівської рідини маємо таке: $B_e = f_3(m)$, де m – емпіричний коефіцієнт, який враховує гідродинамічні вхідні ефекти на трубці; а для турбулентного дроселя типу циліндричного отвору в тонкій стінці: $B_e = f_3(\alpha)$, де α – емпіричний коефіцієнт витрати дроселя.

Математичні моделі окремих дросельних елементів є відомі [2,3,4]. Так, наприклад, при ламінарному русі нестискуваної рідини в довгій капілярній трубці витратна характеристика має вигляд:

$$Q = \frac{\pi \cdot d^4}{128 \cdot l} \cdot \frac{\rho}{\mu} \cdot (P_{ex} - P_{вих}), \quad (2)$$

а в короткій трубці при цих же умовах руху:

$$Q = \frac{4 \cdot \pi \cdot l \cdot \mu}{m} \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{m \cdot \rho \cdot d^4 \cdot (P_{ex} - P_{вих})}{256 \cdot l^2 \cdot \mu^2}} - 1 \right]. \quad (3)$$

Для дроселя типу отвору в тонкій стінці (діафрагма) при турбулентному русі нестискуваної рідини витратна характеристика має вигляд:

$$Q = \frac{\pi \cdot \alpha \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot (P_{ex} - P_{вих}) \cdot \rho}. \quad (4)$$

З витратних характеристик дросельних елементів визначається конкретний вигляд залежностей для комплексів B_k , B_n і B_e . Так, наприклад, для витратної характеристики (2)

маємо $B_k = \frac{d^4}{l}$ і $B_n = \frac{\rho}{\mu}$, а для витратної характеристики (3) – $B_k = d^2$; $B_n = \sqrt{\rho}$; $B_e = \alpha$.

Із рівнянь (3) і (4), а також з інших рівнянь витратних характеристик [2,3,4], видно, що більшість дросельних елементів належать до нелінійних елементів. В зв'язку з цим будь-яка вимірювальна система, побудована на дросельних елементах, буде мати властивості, обумовлені в тому числі і їх нелінійністю. В [2,3] також показано, що витратні характеристики дроселів, а відповідно і їх застосування, мають ті чи інші обмеження, зокрема за гідродинамічним критерієм (число Рейнольдса), при недотриманні яких змінюється вигляд рівняння характеристики.

Рівняння витратних характеристик дають можливість оцінити доцільність побудови вимірювальних перетворювачів на тому чи іншому дросельному елементі. Так, в рівняння (1) входить шість величин: P_{ex} , $P_{вих}$, B_k , B_n , B_e , Q . Кожна з цих величин чи тих, що її визначають, але якась одна, може бути вхідною величиною вимірювального перетворювача. Вихідною величиною можуть бути або Q , або P_{ex} , або $P_{вих}$. Всі решта величини, крім вхідної і вихідної, повинні бути постійними або стабілізуватись, причому їх значення повинні бути відомі. Для нестискуваних рідин замість тисків P_{ex} і $P_{вих}$ можна користуватись одним перепадом тиску $\Delta P = P_{ex} - P_{вих}$.

Отже, при виконанні вказаних умов на одному дросельному елементі в принципі можуть бути побудовані вимірювальні перетворювачі витрати, тиску, конструктивних характеристик дроселя (діаметра або довжини), параметрів рідини (густини, в'язкості, показника адиабати або якогось одного параметра неньютонівської рідини), ряду емпіричних коефіцієнтів, що визначають комплекс B_e , а також температури чи складу рідини.

Для прикладу розглянемо деякі з можливих варіантів побудови таких вимірювальних перетворювачів на одному дросельному елементі. Оскільки вхідною величиною може бути будь-яка із величин, що фігурують в (1), тобто $\{P_{ex}, P_{вих}, Q, X\} \in X_{ex}$, де X – будь-який із параметрів, що входить у комплекси B_k, B_n і B_e чи впливає на ці комплекси, а вихідною величиною – лише $P_{ex}, P_{вих}$ і Q , тобто $\{P_{ex}, P_{вих}, Q\} \in X_{вих}$, то при побудові перетворювачів тиску та витрати (рис. 1) можливі лише по два варіанти схем, а при побудові перетворювачів будь-якого із параметрів X , наприклад μ, ρ, d та ін., можливі три різні варіанти схем (рис. 2). На рис. 1 і рис. 2 застосовано позначення згідно з [5].

Під кожною схемою перетворювача вказана функція перетворення у вигляді $X_{ex} \Rightarrow X_{вих}$, де X_{ex} – вхідна величина перетворювача, $X_{вих}$ – вихідна величина перетворювача. Для нестискуваних рідин, для яких в (1) замість тиску P_{ex} і $P_{вих}$ можна користуватись лише перепадом ΔP_n , кількість можливих варіантів схем побудови перетворювача одного із параметрів X зменшується до двох.

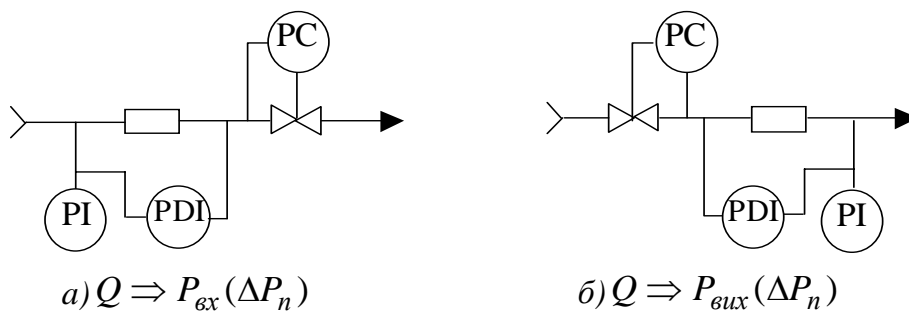


Рис. 1. Побудова вимірювальних перетворювачів витрати Q на дросельному елементі для стискуваних рідин

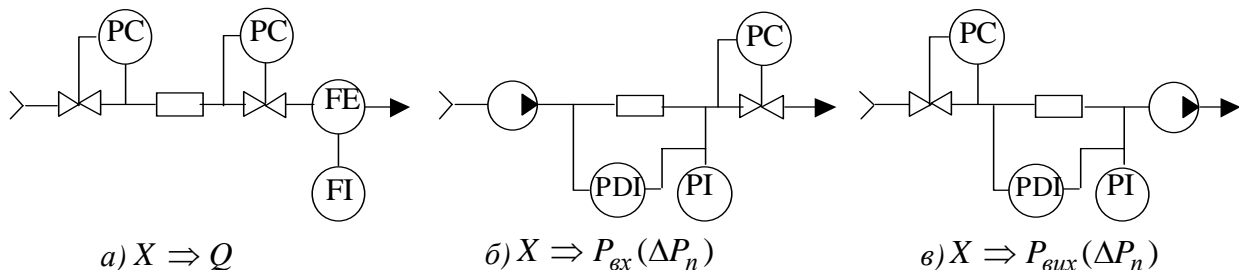


Рис. 2. Побудова вимірювальних перетворювачів параметра X на дросельному елементі для стискуваних рідин

Незважаючи на велику різноманітність дросельних елементів і варіантів схем побудови вимірювальних перетворювачів на одному дроселі, при розробці перетворювача конкретного технологічного параметра не завжди можливо підібрати дросельний елемент з необхідною витратною характеристикою, що задовольняє вимоги стабілізації необхідних фізичних величин (наприклад, забезпечити стабілізацію густини ρ при вимірюванні її в'язкості μ), не завжди можливо забезпечити необхідні функціональні та метрологічні характеристики перетворювача. У зв'язку з цим для отримання необхідних витратних характеристик дросельних елементів, а відповідно – розширення можливостей при побудові газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів технологічних параметрів, запропоновано будувати такі перетворювачі на *складених дросельних елементах*, тобто на елементах, певним чином утворених із *первинних дросельних елементів*. Вище були наведені витратні характеристики деяких первинних дросельних елементів (2–4).

У зв'язку з тим, що тип дросельного елемента визначається видом його витратної характеристики, то для заданого середовища множина типів первинних дросельних елементів буде визначатися їх конструкцією і режимом протікання середовища в дроселі. Отже, для заданого середовища маємо n -елементну множину D_1 типів первинних дросельних елементів:

$$D_1 = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_{n-1}, d_n\}. \quad (5)$$

Назвемо первинні дросельні елементи дроселями першого порядку, а складені дроселі, утворені із S первинних дросельних елементів, – дроселями S -го порядку. У зв'язку з цим дроселі другого порядку – це складені дроселі, утворені із будь-яких двох дроселів першого порядку ($S = 1+1$), а дроселі третього порядку – дроселі, утворені або із будь-яких трьох дроселів першого порядку, або із будь-якого одного дроселя другого порядку і будь-якого одного дроселя першого порядку ($S = 1+1+1$, $S = 2+1$; $S = 1+2$) і т.д. Отже, складені дроселі S -го порядку завжди утворюються із дроселів нижчого порядку, причому сума порядків первинних дроселів, з яких утворюється складений дросель, завжди повинна дорівнювати S .

Для математичного описання структури дроселів вищого порядку пропонується застосувати теорію множин, зокрема теорію впорядкованих множин [6]. Для прикладу розглянемо побудову дроселів другого порядку. При утворенні таких дроселів можливе як послідовне, так і паралельне з'єднання первинних дросельних елементів.

При послідовному з'єднанні первинних дроселів важливим є порядок їх включення в пари. У зв'язку з цим такі дроселі другого порядку можуть бути математично описані та визначені як кортежі довжини 2, компонентами яких є первинні дросельні елементи, тобто це є кортежі над множиною D_1 . Множина шуканих кортежів, тобто множина D_{21} дроселів другого порядку, утворених послідовним з'єднанням дроселів першого порядку, знаходиться як:

$$D_{21} = D_1 \times D_1 \cup D_1 \times D_1. \quad (6)$$

Оскільки ж множина первинних дросельних елементів визначається нами згідно із (5) лише як одна множина D_1 , то $D_1 \times D_1 \cup D_1 \times D_1 = D_1 \times D_1$ і множина D_{21} знаходиться за операцією прямого добутку множин:

Кількість дроселів другого порядку, які можуть бути утворені із n-типів первинних дросельних елементів

n	1	2	3	4	5	6	7
k₂₁	1	4	9	16	25	36	49
k₂₂	1	2	3	4	5	6	7
k₂₃	0	1	3	6	10	15	21
k₂	2	7	15	26	40	57	77

Математична модель складеного дроселя другого порядку відповідає, як і для дроселя першого порядку, його витратній характеристиці. Витратні характеристики дроселів другого порядку, утворених послідовним з'єднанням первинних дросельних елементів, знаходять із системи рівнянь:

$$\begin{cases} Q_{II} = Q_1 = Q_2; \\ Q_1 = f_1(P_{вх}, P_A, B_{к1}, B_n, B_{e1}); \\ Q_2 = f_2(P_A, P_{вих}, B_{к2}, B_n, B_{e2}), \end{cases} \quad (15)$$

де P_A – міждросельний тиск, а індекси 1 і 2 відносять змінні в рівняннях (15) відповідно до першого і другого за рухом середовища первинних дросельних елементів. Решта позначень відповідають рівнянню (1), форма якого прийнята і для витратних характеристик окремих первинних дросельних елементів в (15). Для більшості типів первинних дросельних елементів систему (15) можна розв'язати аналітично.

Для дроселів другого порядку, утворених паралельним з'єднанням дросельних елементів, витратна характеристика визначається безпосередньо із системи рівнянь (16):

$$\begin{cases} Q_{II} = Q_1 + Q_2; \\ Q_1 = f_1(P_{вх}, P_{вих}, B_{к1}, B_n, B_{e1}); \\ Q_2 = f_2(P_{вх}, P_{вих}, B_{к2}, B_n, B_{e2}). \end{cases} \quad (16)$$

Тут індекси 1 і 2 відносять змінні відповідно до верхнього і нижнього первинного дросельного елемента.

В загальному вигляді витратну характеристику дроселя другого порядку, яку отримуємо із (15) та (16), можна записати аналогічно до (1), як:

$$Q_{II} = f(P_{вх}, P_{вих}, B_n, B_{к1}, B_{к2}, B_{e1}, B_{e2}), \quad (17)$$

де Q_{II} – витрата середовища через складений дросель другого порядку.

Аналогічно до вищесказаного витратні характеристики дроселів третього порядку можна визначати відповідно до прийнятої методології їх утворення через витратні характеристики дроселів другого порядку та витратні характеристики дроселів першого порядку, тобто через систему рівнянь, утворену із (17) та (1). При цьому залежно від способу з'єднання цих дроселів – послідовне чи паралельне – використовується форма запису, що відповідає системі (15) чи системі (16). В узагальненому ж вигляді витратну характеристику дроселя третього порядку можна записати як:

$$Q_{III} = f(P_{вх}, P_{вих}, B_n, B_{к1}, B_{к2}, B_{к3}, B_{e1}, B_{e2}, B_{e3}). \quad (18)$$

Аналогічно можна записати в узагальненому вигляді витратну характеристику для дроселя четвертого порядку:

$$Q_{IV} = f(P_{вх}, P_{вих}, B_n, B_{к1}, B_{к2}, B_{к3}, B_{к4}, B_{e1}, B_{e2}, B_{e3}, B_{e4}). \quad (19)$$

На основі утворення складених дроселів другого, третього та четвертого порядку була розроблена методологія побудови складених дроселів, яка поширюється на дроселі будь-якого порядку; складений дросель S -го порядку утворюється послідовним чи паралельним з'єднанням двох дроселів нижчих порядків, причому сума порядків вихідних дроселів, які утворюють складений дросель, завжди повинна дорівнювати S . При цьому дроселі S -го порядку утворюються із $(S - 1)$ кількості пар вихідних дроселів різних порядків. Очевидно, що з метою визначення всіх можливих схем побудови складених дроселів необхідно при їх утворенні перебрати всі можливі пари вихідних дроселів, сума порядків яких дорівнює S .

Витратна характеристика складених дроселів S -го порядку за аналогією до (17), (18), (19) описується в загальному випадку рівнянням:

$$Q_S = f(P_{вх}, P_{вих}, B_n, B_{к_1}, B_{к_2}, \dots, B_{к_S}, B_{e_1}, B_{e_2}, \dots, B_{e_S}). \quad (20)$$

Велика різноманітність складених дросельних елементів створює і більш широкі можливості при побудові на їх базі газогідродинамічних дросельних вимірювальних перетворювачів технологічних параметрів. Так, нами враховано, що лише із трьох найвживаніших первинних дросельних елементів – ламінарного, турбулентного і змішаного (їх витратні характеристики для нестискуваного середовища описані відповідно залежностями (2), (4) і (3)) – можна побудувати 15 складених дроселів другого порядку, 100 складених дроселів третього порядку, а також 804 складених дроселі четвертого порядку. Кожен такий дросель характеризується певною, властивою лише йому, витратною характеристикою, причому ця характеристика буде різною ще й залежно від виду середовища, що протікає через дросель.

Дослідження цих витратних характеристик, а заодно і властивостей вимірювальних перетворювачів технологічних параметрів, побудованих на вказаних дросельних елементах, виконується моделюванням на ПЕОМ. Нами розроблено програмне забезпечення такого моделювання, яке з успіхом може бути застосоване під час проектування конкретних газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів тих чи інших технологічних параметрів.

1. Залманзон Л. А. *Аэрогидродинамические методы измерения входных параметров автоматических систем.* – М.: Наука, 1973. – 464с. 2. Пистун Е.П., Теплюх З.Н., Стасюк И.Д. *Расходные характеристики газодинамических дросельных элементов.* – В кн.: *Пневматические и гидравлические устройства и системы управления. X Международная конференция "Яблонна".* – М.: Энергоатомиздат, 1986. – С. 31–34. 3. Теплюх З.Н., Пистун Е.П. *О применимости различных функциональных зависимостей для описания расходных характеристик турбулентных дроселей // Измерительная техника.* – 1977. – № 2. – С.48–50. 4. Богачева А.В. *Пневматические элементы систем автоматического управления.* – М.: Машиностроение, 1966. – 240 с. 5. ДСТУ Б А.2.4-3-95Б. *Правила виконання робочої документації автоматизації технологічних процесів.* – К., 1997. 6. Шиханович Ю.А. *Введение в современную математику.* – М.: Наука, 1965. – 365 с.