

Висновки. Як очевидно з таблиці, похибки вимірювання витрати внаслідок трансфузії газів для мірних трубок малих об'ємів можуть сягати до 1 % (наприклад, для аргону). Тому для точних вимірювань процес трансфузії необхідно враховувати та вживати заходів щодо зменшення вказаної похибки. Для зменшення трансфузії газів через плівку під час вимірювання витрати треба запобігати появі різниці парціальних тисків. Найпростіше це зробити загином вниз вихідного кінця мірної трубки витратоміра. Також для зменшення різниці парціальних тисків газів рекомендуємо перед вимірюванням витрати – декілька разів пропустити плівку по трубці витратоміра (особливо – для газів, які за складом істотно відрізняються від повітря).

1. Теплох З.М., Парнета О.З. Високоточний плівковий витратомір // Теплоенергетика. Інженерія докільля. Автоматизація / Вісник Нац. ун-т "Львівська політехніка". – № 506. – 2004. – С. 275–282. 2. Теплох З.М., Парнета О.З. Аналіз похибок плівкового витратоміра газу // Вимірювальна техніка та метрологія. – № 62. – 2003. – С. 114–119. 3. 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. 4. Кругляков П.М., Ексерова Д.Р. Пена и пенные пленки. – М.: Химия, 1990. 5. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: Справочн. пособие. – 3-е изд., – Л.: Химия, 1982. 6. Краткий справочник физико-химических величин / Под ред. А.А. Равделя и А.М. Пономаревой. – Л.: Химия, 1983. 7. Дж. Перри Справочник инженера-химика. – Л.: Химия, Т. 1, 1969.

УДКК 681.2.53.082.3:543.27

І.В. Ділай, З.М. Теплох

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

ГАЗОДИНАМІЧНИЙ ЗРІВНОВАЖЕНИЙ МІСТ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ДРОСЕЛІВ З РІВНИМИ ОПОРАМИ

Ї Ділай І.В., Теплох З.М., 2008

Оцінено чутливість газодинамічного зрівноваженого моста до зміни довжини капілярного дроселя, включеного в одне із плечей. Показана можливість оптимізації моста за критерієм мінімуму похибки одержання дроселів з рівними опорами.

In the article gas-dynamic balanced bridge sensitivity over change of capillary throttle length, included in one of bridge arm is estimated and possibility of bridge optimization to criterion of error minimum receiving of throttles with equal resistances is considered.

Постановка задачі. У вимірювальній техніці, автоматичі, а також для дозування газів і приготування газових сумішей застосовують різні типи дроселів (капілярна трубка, діафрагма, сопло, сопло-заслінка, конус-діафрагма тощо), газодинамічні опори (ГДО) яких повинні мати точно задані значення [1,2]. Проте сучасні методи і засоби вимірювання не забезпечують достатньої точності визначення ГДО дроселів, тому сьогодні перспективнішим є розроблення диференційних методів і пристроїв, в яких значення ГДО досліджуваних дроселів оцінюється щодо вибраного опорного дроселя.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Найвищу точність підбору дроселів з рівними опорами на одному газі може забезпечити пристрій, побудований на базі зрівноваженої дросельної мостової схеми, де в суміжні плечі включені досліджуваний і опорний дроселі [3, 4]. У роботі [5]

показано, що похибка підгонки опорів капілярних трубок з однаковим ГДО за допомогою такого моста визначається чутливістю схеми, чутливістю показчика рівноваги моста і перепадом тисків у діагоналі живлення і може не перевищувати 0,001 %.

Метою роботи є дослідження вказаної мостової схеми з нуль-індикаторами перепаду тисків і витрати газу у вихідній діагоналі, а також розроблення рекомендацій щодо її оптимізування.

Особливості газодинамічного моста

У спрощеному вигляді дросельна мостова схема (рис.1) містить чотири дроселі $D_1 \dots D_4$ і показчик рівноваги НІ (нуль-індикатор). Процедура одержання дроселів з рівними опорами за допомогою такої схеми описана в статті [5]. Дроселями $D_1 \dots D_4$ можуть бути будь-які із згаданих, проте найточніша підгонка опору можлива лише скороченням довжини капілярної трубки (підпилюванням, шліфуванням). У роботах [3–5] розглянутий варіант побудови моста з дифманометром у вихідній діагоналі, проте показчиком рівноваги може бути як дифманометр, так і високочутливий малоінерційний анемометр [6–10]. Залежно від типів застосовуваних дроселів, композиції цих типів, режимів живлення моста, а також від величини вхідного газодинамічного опору R_n показчика можливі десятки варіантів побудови моста. У зв'язку із зазначеним розглядатимемо лише мости з використанням як порівнюваних дроселів капілярних трубок, мости із стабілізованими абсолютними тисками у діагоналі живлення і з двома типами показчика рівноваги – нуль-індикатора перепаду тисків $\Delta P_{ab} = P_a - P_b$ між камерами a, b (режим роботи моста з опором діагоналі $R_{ab} = \infty$) і нуль-індикатора витрати q у вихідній діагоналі моста (режим $0 < R_{ab} < \infty$).

Оскільки похибка підгонки опорів капілярних трубок з однаковим ГДО за допомогою такого моста істотно залежить від його чутливості до скорочення довжини капілярної трубки, то важливо є проаналізувати від чого залежить ця чутливість для обидвох режимів роботи моста і на основі цього розробити рекомендації щодо оптимізування дросельної мостової схеми.

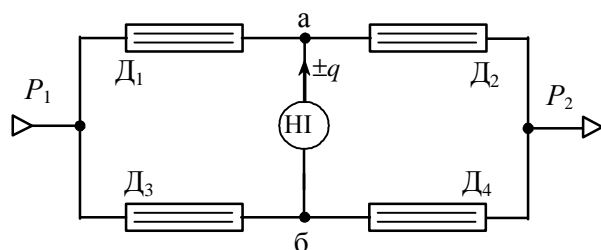


Рис. 1. Принципова схема газодинамічного моста. $D_1 \dots D_4$ – дросельні елементи; НІ – нуль-індикатор; a, b – міждрозельні камери (вершини вихідної діагоналі моста)

Враховуючи те, що газодинамічний міст складається з двох послідовно з'єднаних перетворювачів – дросельної схеми і показчика рівноваги моста, кожен з яких має свою власну чутливість, можна записати таке співвідношення [11]:

$$S_m = S_{cx} \cdot S_n, \quad (1)$$

де $S_m = dv / dl$ – чутливість моста; v – вихідний сигнал показчика рівноваги (переміщення вказівника показчика, цифровий відлік тощо); l – довжина капіляра, опір якого потрібно підігнати; $S_{cx} = dw / dl$ – чутливість дросельної схеми; $w \in \{\Delta P_{ab}, q\}$ – вихідний сигнал дросельної схеми (вхідний сигнал показчика); $S_n = dv / dw$ – чутливість показчика рівноваги.

Чутливість S_n показчика рівноваги є величиною, яка визначається типом вибраного приладу, тобто є фактично заданою. Тому, як випливає з (1), максимальна чутливість S_m моста існує лише за умови досягнення максимальної чутливості S_{cx} дросельної схеми. У зв'язку з цим постає задача оптимального вибору параметрів схеми. При цьому цю задачу необхідно окремо розглянути для $R_{ab} = \infty$ і $0 < R_{ab} < \infty$.

Нехай потрібно виготовити дросель з опором, що дорівнює опору R_2 дроселя D_2 . Для цього у попередньо зрівноважену схему на місце D_2 ставлять капіляр з опором \check{R}_2 дещо більшим за R_2 , тобто $\check{R}_2 = R_2 + \Delta_{R_2}$, де Δ_{R_2} – відхилення від опору R_2 , величина якого (відхилення) визначається недосконалістю експерименту або моделі для розрахунку. Заміна капіляра з опором R_2 на капіляр з опором \check{R}_2 зумовлює появу $\Delta_{Pa\check{o}}$ або витрати q у вихідній діагоналі моста. Далі незначним поступовим скороченням довжини l_2 капіляра з початковим опором \check{R}_2 знову зрівноважують схему, тим самим зменшуючи Δ_{R_2} до величини, що визначається порогом чутливості моста, який своєю чергою залежить від чутливості S_{cx} дросельної схеми.

Чутливість S_{cxP} схеми з опором $R_{a\check{o}} = \infty$

Така дросельна схема фактично є паралельним з'єднанням двох незалежних один від одного подільників тиску: перший утворений послідовним з'єднанням дроселів D_1 і D_2 ; другий – D_3 , D_4 . Тому для дослідження чутливості S_{cxP} достатньо розглядати лише подільник, в якому встановлений капіляр, газодинамічний опір якого треба зробити таким, що дорівнює заданому. Оскільки при цьому дроселі D_3 , D_4 другого подільника залишаються без змін, то $P_{\check{o}} = const$, а $\Delta_{Pa\check{o}} = \Delta_{Pa}$.

Чутливість S_{cxP} такої схеми визначається похідною різниці тисків у вимірювальній діагоналі по довжині прохідного каналу підбираного дроселя і дорівнює

$$S_{cxP} = d \Delta_{Pa\check{o}} / dl_2 = dP_a / dl_2. \quad (2)$$

Міждросельний тиск P_a описується залежністю [12], поданою у вигляді

$$P_a = [\alpha - \beta \cdot \check{y} \cdot L \cdot E]^{1/2}, \quad (3)$$

де $\alpha = (P_1^2 + b \cdot P_2^2) / \check{o}$; $b = (d_2 / d_1)^4$; $\check{o} = b + 1$; $\beta = 2 / (L \cdot \check{o})$; $L = X \cdot K_1 \cdot \check{o}$; $K_1 = m \cdot d_1^4 / l_1^2$; $X = M / (4,257 \cdot 10^6 \cdot T \cdot \mu^2)$; $\check{y} = 1 - \check{y}$; $\check{y} = l_2 / l_1$; $L = \check{y} + b$; $\gamma = L \cdot P_{12} \cdot b$; $P_{12} = P_1^2 - P_2^2$; $E = (1 + \gamma / L^2)^{1/2} - 1$; P_1 і P_2 – абсолютні тиски на вході і виході моста; d_1 і l_1 , d_2 і l_2 – відповідно діаметр і довжина прохідного каналу капілярів D_1 , D_2 ; m – коефіцієнт кінцевих ефектів; M – молекулярна маса газу; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості газу за температури T .

За допомогою (2) і (3) одержуємо чутливість дросельної схеми у вигляді

$$S_{cxP} = \beta \cdot E \cdot [L + \check{y} / (E + 1)] / (2 \cdot l_1 \cdot P_a). \quad (4)$$

Формула (4) відображає залежність чутливості S_{cxP} мостової схеми від розмірів прохідних каналів капілярів D_1 , D_2 , виражених конструктивним комплексом K_1 капіляра D_1 та відношеннями діаметрів b і довжин \check{y} цих капілярів; тисків P_1 , P_2 живлення моста; температури T і параметрів M , μ газу. Дослідження показують, що S_{cxP} сильно залежить від співвідношення розмірів прохідних каналів капілярів та тисків живлення і мало залежить від параметричного комплексу X . Вибір тисків живлення є обмеженим (умовами використання підібраних дроселів, наявністю ламінарного потоку в капілярі та іншими факторами), тому співвідношення розмірів прохідних каналів капілярів є основними факторами, які впливають на чутливість мостової схеми. Оскільки з практичних міркувань міст доцільно будувати на капілярах з однаковим діаметром прохідних каналів, то важливим є визначити оптимальну величину \check{y} , яка забезпечує максимальну чутливість S_{cxP} . Як приклад на рис. 2а показано графіки залежності чутливості S_{cxP} від співвідношення довжин \check{y} дроселів подільника і тисків живлення, виражених перепадом тисків $\Delta_{P_{ж}} = P_1 - P_2$.

Як очевидно із рис. 2а графіки чутливості мають максимум для певного співвідношення \check{y} капілярів, яке можна знайти із умови екстремуму функції $S_{cxP} = f(\check{y})$, тобто з рівняння $d S_{cxP} / d \check{y} = 0$. Встановлено, що максимум чутливості відповідає конструкції подільника, коли на кожному із капілярів подільника встановлені приблизно однакові перепади тиску, тобто коли $\Delta_1 \approx \Delta_2$ ($\Delta_1 = P_1 - P_a$, $\Delta_2 = P_a - P_2$), звідки

$$P_a \approx (P_1 + P_2) / 2. \quad (5)$$

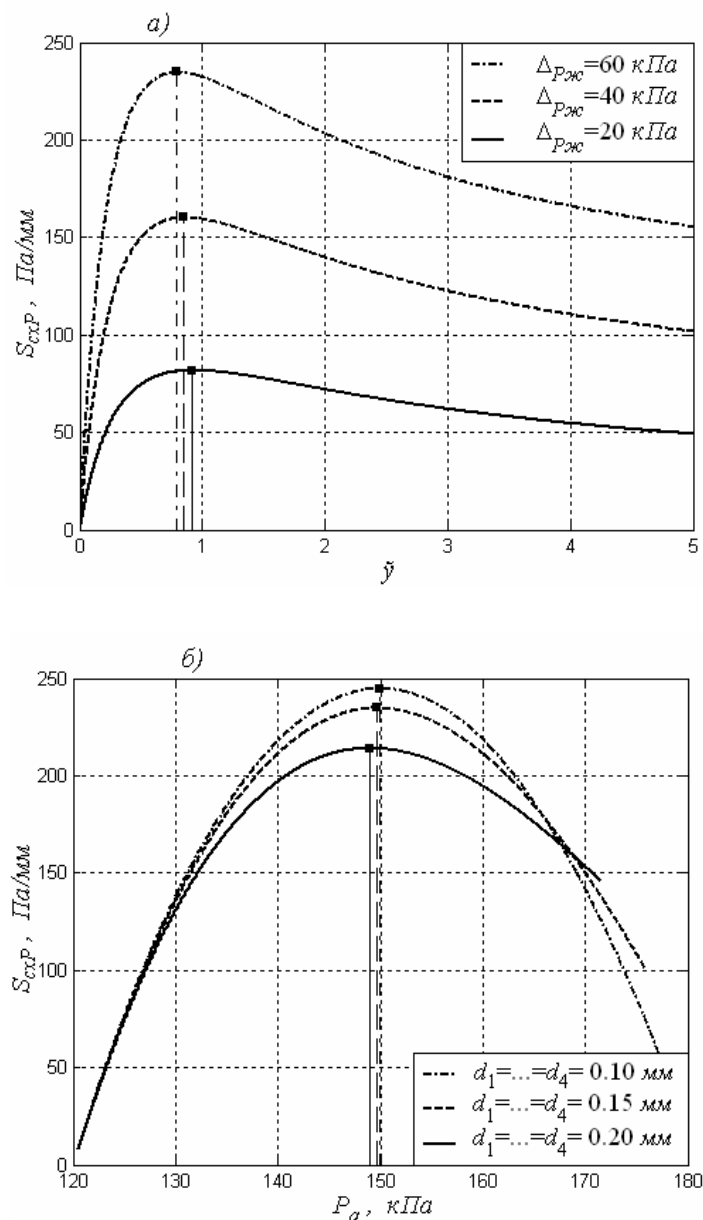


Рис. 2. Залежність чутливості до зміни довжини l_2 капіляра від конструкції моста, вираженої:
 а – співвідношенням \tilde{y} капілярів для різних $\Delta P_{жс}$ мостової схеми ($d_1 = \dots = d_4 = 0,15$ мм);
 б – міждросельним тиском P_a зрівноваженого моста.

Робоче середовище та його параметри стану: азот; $P_2 = 120$ кПа; $T = 300$ К; $l_2 = l_4 = 60$ мм

Ці результати наочніше зображені на рис. 2б залежністю чутливості S_{cxP} від значення міждросельного тиску P_a , який однозначно відображає параметр \tilde{y} . Крім того, з рис. 2б бачимо, що чутливість схеми практично не залежить від величини абсолютних розмірів прохідного каналу досліджуваного капіляра.

Отже, залежність (5) є умовою оптимізації мостової схеми з нуль-індикатором перепаду тисків у вихідній діагоналі і при цьому чутливість схеми для вказаних умов моделювання досягає 80–240 Па/мм, що є достатнім для точного підбору капілярів з рівними ГДО.

Чутливість S_{cxq} схеми з опором $0 < R_{a\delta} < \infty$

Таку дросельну схему на відміну від попередньої не можна розглядати як паралельне з'єднання двох незалежних подільників тиску, оскільки у невірноваженому стані існує перетік газу з однієї міждросельної камери в іншу, тобто зміна довжини l_2 капіляра призводить до зміни тисків

P_a і P_b , а відповідно і до зміни величини (або і напрямку) потоку у вихідній діагоналі моста. Тому для дослідження чутливості S_{cxq} потрібно використовувати математичну модель моста з врахуванням опору $R_{a\bar{b}}$ покажчика рівноваги [13], що істотно ускладнює аналіз.

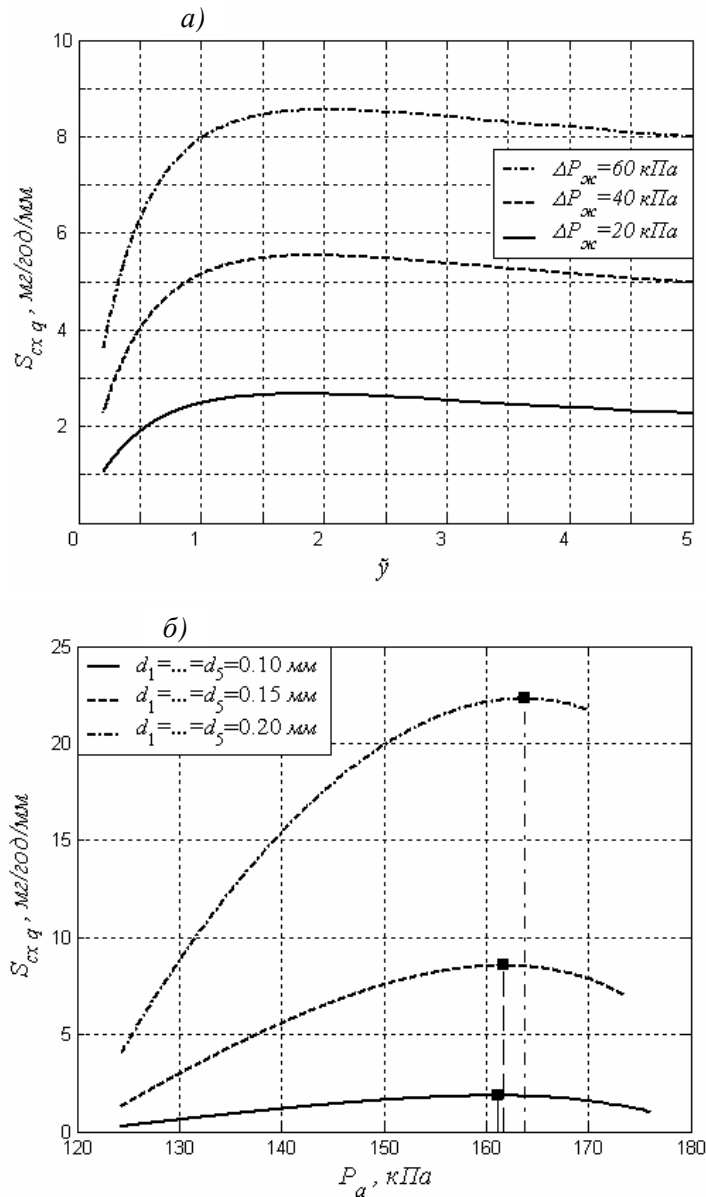


Рис. 3. Залежність чутливості S_{cxq} до зміни довжини l_2 від конструкції моста, вираженої:
 а – співвідношенням \bar{y} капілярів для різних $\Delta P_{ж}$ мостової схеми ($d_1 = \dots = d_5 = 0,15$ мм);
 б – міждросельним тиском P_a зрівноваженого моста.
 Робоче середовище та його параметри стану: азот; $P_2 = 120$ кПа; $T = 300$ К; ($l_2 = l_4 = l_5 = 60$ мм)

Чутливість S_{cxq} такої схеми визначається похідною витрати q у вихідній діагоналі по довжині l_2 прохідного каналу підбираного дроселя як

$$S_{cxq} = dq / dl_2 . \quad (6)$$

Для спрощення аналізу замість нуля-індикатор витрати q у вихідній діагоналі моста капіляром D_5 , що цілком допустимо, оскільки перепад $\Delta P_{a\bar{b}}$, а відповідно і витрата q є малими. Математична модель такого моста є системою трьох нелінійних рівнянь з трьома невідомими (q , P_a і P_b):

$$\left. \begin{aligned} G_1 + q &= G_2; \\ G_3 - q &= G_4; \\ q &= G_5, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

де $G_i = A_i \cdot \sqrt{1 + Z_i}$; $A_i = a \cdot l_i$; $a = 4\pi \cdot \mu / m$; $Z_i = Y_i \cdot B_i$; $Y_i = K_i \cdot X$; $K_i = m \cdot d_i^4 / l_i^2$; $i = \overline{1,5}$;
 $B_1 = P_1^2 - P_a^2$; $B_2 = P_a^2 - P_2^2$; $B_3 = P_1^2 - P_6^2$; $B_4 = P_6^2 - P_2^2$; $B_5 = P_6^2 - P_a^2$.

Оскільки із цієї системи вираз для вихідного сигналу (q) схеми не можна подати у явному вигляді, оскільки це можливо для вихідного сигналу (Δ_{Pa6}) схеми з $R_{a6} = \infty$, то аналіз чутливості S_{cxq} виконувався за допомогою числового моделювання системи (7) заданням малих приростів Δl_2 довжини l_2 , а чутливість визначали як

$$S_{cxq} = \Delta q / \Delta l_2 \Big|_{\Delta l_2 \rightarrow 0}, \quad (8)$$

де Δq – приріст витрати q , спричинений приростом Δl_2 .

Результати цих досліджень показані на рис. 3.

Як очевидно із графіків рис. 3 максимальна чутливість S_{cxq} порівняно з режимом $R_{a6} = \infty$ існує для інших значень параметра γ , а саме коли $R_1 \ll R_2$ і $R_3 \ll R_4$, а відповідно $\Delta_1 \ll \Delta_2$ і $\Delta_3 \ll \Delta_4$ ($\Delta_3 = P_1 - P_6$, $\Delta_4 = P_6 - P_2$), тобто коли

$$(P_1 + P_2) / 2 < P_a < P_1. \quad (9)$$

Крім того, з рис. 3б бачимо, що чутливість S_{cxq} істотно залежить від опору дроселя D_5 (діаметра d_5) і що максимальна чутливість S_{cxq} існує, коли

$$R_5 \ll R_2. \quad (10)$$

Отже, залежності (9) і (10) є умовами оптимізації мостової схеми з нуль-індикатором витрати у вихідній діагоналі і при цьому чутливість схеми для вказаних умов моделювання є достатньою для точного підбору капілярів з рівними ГДО.

Висновки. Для двох типів показників рівноваги газодинамічного моста досліджена чутливість схеми до зміни довжини підбираного капілярного дроселя в одному із плеч, а також показана можливість оптимізації моста за критерієм мінімуму похибки одержання дроселів з рівними ГДО.

1. Теплох З.М., Ділай І.В. Задавач кратних малих витрат газу // Вимірювальна техніка та метрологія / Міжвідомчий наук.-техн. зб. – Вип.65. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2005. – С.87–91. 2. Теплох З.М. Принципи побудови високоточних дросельних синтезаторів газових сумішей // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Автоматика, вимірювання та керування”. – Львів, 2006. – №551. – С.87–94. 3. А. с. 1760406 СССР, МКІ⁵ G05L 7/00. Способ подбора дроселей с равными газодинамическими сопротивлениями / Е.П. Пистун, З.Н. Теплох, И.В. Дилай. – Бюлл. изобретений № 33, 1992. 4. Теплох З., Пистун Е., Ділай І. Пристрої для встановлення рівності опору дроселів синтезатора газових сумішей // Вимірювальна техніка та метрологія / Міжвідомчий наук.-техн. зб. – Вип.59, – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2002. 2 – С.178–182. 5. Івахів О.В., Теплох З.М. Підгонка опору дроселів з допомогою газодинамічного моста // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Автоматика, вимірювання та керування”. – Львів. 2003. – №476. – С.15–21. 6. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. – 4-е изд. – Л.: Машиностроение, 1989. – 709 с. 7. Хансуваров К.И., Цейтлин В.Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 287 с. 8. Бухгольц В.П., Тисевич Э.Г. Емкостные преобразователи в системах автоматического контроля и управления. – М.: Энергия, 1972. – 79 с. 9. Бойков Н.А., Звездин П.С.,

Резник Л.Б. Измерение давлений при быстропотекающих процессах. М.: Энергия, 1970. – 64 с.

10. Богатыренко К.И. и др. Об использовании термоанемометрических датчиков в угломерных зондах // Энергетическое машиностроение: Респ. межвед. научн.-техн. сборник / Харьк. политехн. ин-т. – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьковск. ун-те, 1979. – Вып.28 – С.106–109.

11. Электрические измерения. Средства и методы измерений. / Под ред. Е.Г. Шрамкова. – М.: Высшая школа, 1972. – 519 с.

12. Теплюх З.М. Розрахунок ламінарного подільника тиску // Вісн. Держ. ун-ту “Львівська політехніка”. Теплоенергетичні системи та пристрої. – Львів, 1993. – №273. – С. 42–44.

13. Пистун Е.П., Теплюх З.Н. Математическое моделирование газодинамических дроссельных мостовых измерительных схем // Автоматика, №3. – К: Наукова думка, 1985. – С. 38–42.