

СИНТЕЗ ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ З МІКРОКОНЦЕНТРАЦІЯМИ КОМПОНЕНТІВ

Запропоновані принципи побудови високоточних газодинамічних синтезаторів для одностадійного приготування складних багатоконцентних газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів. Наведений приклад розробки синтезатора для перевірки сигналізаторів чадного газу.

Ключові слова: газова суміш, газодинамічний синтезатор, мікроконцентрація.

I.V. DILAY, Z.M. TEPLYUKH, O.I. TSITSYURA

National University Lviv Politechnic, Ukraine

SYNTHESIS OF GAS MIXTURES WITH MICRO-CONCENTRATIONS OF COMPONENTS

The problem of preparation of gas mixtures with accurate compositions is not solved and is especially important for complex multi-component mixtures where some components exist with micro-concentrations. One of most promising implements for preparation of such mixtures is the gas synthesizer based on the dosing capillaries for mixing the flows of pure gas components.

The objective of this work is to develop the principles for construction of high-accuracy gas-dynamical synthesizers for preparation of gas mixtures of various compositions with micro-concentrations of components. The most important principles are as follows. The synthesis of composition should be carried out under various differential pressures across the dosing capillaries of the mixer for various components i.e. the differential pressure for components with micro-concentrations is multiple times lower than that for components with macro-concentrations. The differential pressures across the dosing capillaries should be set by means of the pressure repeater based on the multi-cascade pressure divider. All the capillaries of the synthesizer (including the dosing capillaries and the pressure dividing capillaries) should be linear for providing the proportional variation of the inter-throttle pressures of the divider as well as flows of components through the dosing capillaries.

As an example of application of the developed principles the synthesizer is given in the paper for checking the functioning of the choke gas indicator providing preparation of mixtures with concentration of 20 ppm of CO in air.

Keywords: gas mixture, gas-dynamical synthesizer, micro-concentration

Висвітлення предмету. Газові суміші (ГС) застосовують в різних сферах людської діяльності (зокрема, в системах життєзабезпечення, техніці, метрології, науці) [1, 2]. Проте проблема приготування сумішей точно заданого складу не є вирішеною і особливо актуальна для складних багатоконцентних сумішей, в яких частина компонентів є на рівні мікроконцентрацій [3]. Другою актуальною проблемою є практична відсутність якісних засобів для одержання сумішей різного складу (компонентного чи концентраційного) за допомогою одного пристрою [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що одними з найперспективніших засобів для приготування таких ГС є газодинамічні синтезатори (ГДС), побудовані на змішуванні дозованих капілярами потоків компонентів від джерел чистих газів [5].

На основі розроблених нами раніше базових принципів побудови ГДС [5] можна створювати пристрої синтезу складних ГС різного заданого складу з мілі- ($1 \dots 10^{-2}$ %) та мікроконцентраціями ($10^{-2} \dots 10^{-4}$ %) окремих компонентів, проте для цього необхідно застосовувати дуже велику кількість (сотні і тисячі) капілярів і/або багатостадійне розчинення окремих компонентів із скиданням частини проміжних сумішей. Крім того, таке ускладнення ГДС може значно збільшити похибки концентрацій компонентів синтезованої суміші.

Метою роботи є розроблення (в доповнення до базових) принципів побудови ГДС високої точності для приготування ГС різного складу з мікроконцентраціями компонентів та відповідних їм принципів схем, а також конкретного прикладу їх реалізації, зокрема у синтезаторі для перевірки сигналізаторів чадного газу.

Основні ідеї

Розроблені нами раніше базові принципи побудови ГДС задля високої точності приготування суміші передбачають роботу усіх дозуючих капілярів за *однакових* перепадів тисків, що забезпечує відносно просту реалізацію таких синтезаторів для макроконцентрацій (100...1 %) компонентів. Так, дослідження суматора потоків двох з найпоширеніших газів [6], побудованого з використанням лише одного лінійного капіляра в каналі кожного компонента, показали, що максимальне співвідношення об'ємних (масових) витрат різних компонентів можна отримати на рівні 400 (100) в залежності від їх властивостей, а найменшу концентрацію, відповідно, – на рівні 0,25 % (1 %). Варто відзначити, що для більшості використовуваних пар компонентів значення цих параметрів значно відрізняються від вказаних граничних.

Для приготування суміші з нижчими концентраціями можна збільшувати кількість капілярів у каналі з більшою концентрацією, проте, це все одно обмежує найменшу концентрацію до рівня міліконцентрацій і часто нераціонально збільшує витрату суміші. Досягнення ж мікроконцентрацій зв'язане із зростанням кількості капілярів до недопустимого значення. Так, у синтезаторі з рівноопоровими лінійними капілярами в усіх каналах компонентів для приготування суміші з концентрацією компонента на рівні 0,001 % потрібно залучити тисячі капілярів і навіть у разі використання капілярів з максимально можливою провідністю (тобто нелінійних), обмеженою режимним (число *Re*) і конструктивними (розмірами прохідного каналу) параметрами, треба залучати сотні таких капілярів.

Відомі базові принципи для одержання сумішей з мікроконцентраціями компонентів рекомендують

застосування схеми багатостадійного розчинення компонента (компонентів), проте, оскільки після кожної стадії розчинення (окрім останньої) потрібно скидати більшу частину проміжної суміші (до 99 %), таке вирішення зважаючи на ціну чистих компонентів часто є економічно невігідним. Крім того, багатостадійне розчинення призводить до зниження точності приготування газової суміші.

Для розширення можливостей ГДС в приготуванні багатокомпонентних ГС заданого складу з мікроконцентраціями компонентів базові принципи доповнені такими.

1. Синтез суміші повинен здійснюватися за різних перепадів тисків ΔP на дозуючих капілярах змішувача для різних компонентів. При цьому мінімальне значення перепаду ΔP_{min} потрібно задавати на капілярах, які дозують компонент з найменшою концентрацією r_{min} в суміші, а максимальне ΔP_{max} – на капілярах, які формують потік компонента з найбільшою концентрацією r_{max} ; для компонентів з концентраціями $r_{min} < r < r_{max}$ перепади ΔP задають з проміжку $\Delta P_{min} < \Delta P < \Delta P_{max}$ відповідно до концентрацій компонентів.

2. З метою підвищення точності синтезу перепади тисків на дозуючих капілярах слід задавати з допомогою багатоеlementного подільника, кількість капілярів якого визначається кількістю суттєво різних концентрацій компонентів у синтезованій суміші.

3. Подільник для завдання суттєво різних перепадів на дозуючих капілярах треба будувати як каскадне з'єднання кількох подільників тиску таким чином, що кожен наступний подільник ділить перепад на останньому капілярі попереднього подільника. Так, якщо на одному каскаді подільника в силу різних обмежень можна досягнути найбільшого співвідношення $\Delta P_{max}/\Delta P_{min}$ на рівні 27 (наприклад, для повітря), то при застосуванні лише двох каскадів це співвідношення може сягати 730.

4. Усі капіляри синтезатора, тобто і дозуючі, і подільника мають бути виконані як лінійні, що забезпечує пропорційну зміну всіх міжросельних тисків подільника, а отже і витрат компонентів через дозуючі капіляри. Таким чином здійснюється компенсація змін тисків живлення подільника, а крім того уможливорюється зміна витрати синтезованої суміші при незмінних концентраціях її компонентів шляхом зміни тиску на вході подільника.

5. Застосування повітря як робочого газу (найдешевший газ) в подільнику одночасно забезпечує економічне витрачання чистих компонентів.

6. Високоточне відтворення міжросельних тисків подільника на всіх дозуючих капілярах слід виконувати з допомогою системи, побудованої на основі повторювача тиску.

Побудована із застосуванням запропонованих принципів ГДС схема для приготування складних сумішей з мікроконцентраціями компонентів (див. рис.1) складається із змішувача 1 потоків чистих компонентів $КС_1, \dots, КС_N$, дозованих капілярами $КЗ_{i,j}$ відповідних пакетів $ПК_i$ та блоку 2 стабілізованих тисків живлення, який задає тиски P_i на входах пакетів. Тут і далі: N – кількість компонентів синтезованої суміші; i – номер компонента ($i = 1, \dots, N$); j – номер капіляра в i -му пакеті відповідного компонента ($j = 1, \dots, n_i$); n_i – кількість капілярів i -го пакета.

Змішувач компонентів суміші

Схема змішувача побудована так, що в кожному i -му каналі змішувача 1 встановлені послідовно з'єднані повторювач $ПЗ_i$ для відтворення тиску P_i , через який відповідний компонент при заданому тиску надходить на вхід капілярів $КЗ_{i,j}$ пакета $ПК_i$. Дозовані капілярами потоки компонентів змішуються у спільному каналі і встановленому у нім повторювачі $ПЗ_0$, який відтворює вихідний тиск P_0 для усіх дозуючих капілярів, а отримана газова суміш надходить до споживача.

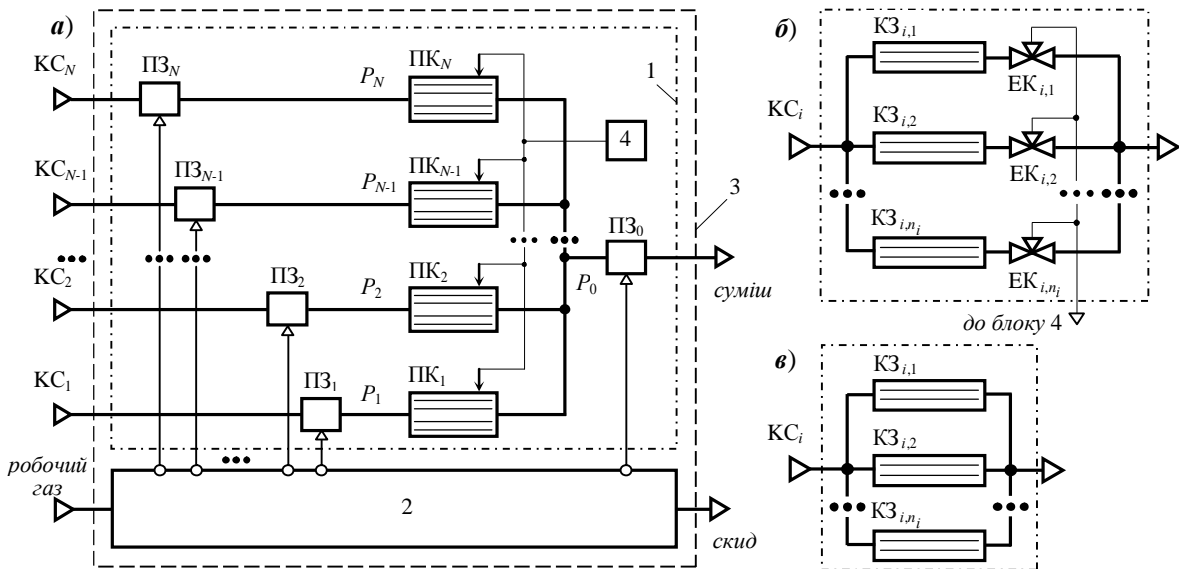


Рис.1. Узагальнені принципові схеми: а) ГДС багатокомпонентних сумішей; б) пакета змінного опору; в) пакета постійного опору;
 1 – змішувач чистих газових компонентів $КС_1, \dots, КС_N$; 2 – блок стабілізованих тисків живлення;
 3 – термостат; 4 – мікроконтролер

Пакети ПК_i можуть бути двох типів – змінного і постійного опору. На виході кожного з капілярів пакета змінного опору встановлений електромагнітний клапан ЕК_{i,j} (див. рис.1 б). Потрібні концентрації компонентів синтезованої суміші задають залученням відповідних капілярів у пакетах змішувача поданням сигналу з мікроконтролера 4 на «ввімкнення-вимкнення» відповідного клапана ЕК_{i,j}. Пакет постійного опору (див. рис.1 в) відрізняється тим, що він не містить електромагнітних клапанів, а представляє собою просто паралельне з'єднання капілярів і служить для збільшення витрати відповідного компонента.

Мікроконтролер керує роботою усього синтезатора (задання концентрацій, регулювання температури, клапани на подачу газів тощо).

Оскільки відомі повторювачі мають похибку відтворення тиску сотні Па [8, 9], то система відтворення тисків для підвищення точності крім повторювача містить також високочутливий нуль-індикатор перепаду тисків між тиском завдання з подільника і тиском на вході (або виході) пакета капілярів, підсилювач небалансу, реверсивний виконавчий механізм і коректуючий дросель, зміною газодинамічного опору якого забезпечується високоточне відтворення тиску з блоку 2 стабілізованих тисків живлення.

Геометричні розміри прохідного каналу *j*-го лінійного капіляра *i*-го пакета можна визначити з допомогою залежностей, отриманих з витратної характеристики капіляра і умови її лінійності [7], які мають вигляд

$$d_{i,j} = [G_{i,j} / \delta_i]^{1/2}, \tag{1}$$

$$l_{i,j} = G_{i,j} / \lambda_i, \tag{2}$$

де $d_{i,j}$ і $l_{i,j}$ – діаметр і довжина прохідного каналу; $G_{i,j}$ – вибрана витрата газу через капіляр; $\delta_i = 4\pi\mu_i \Delta P_i \sqrt{X_i / \xi}$; $X_i = (512 R_{zi} T \mu_i^2)^{-1} = 2,349085 \cdot 10^{-7} M_i / (T \mu_i^2)$ – параметричний комплекс; ΔP_i – перепад тиску на *i*-му пакеті; R_{zi} – газова стала; μ_i – динамічна в'язкість за температури T ; M_i – молекулярна маса; $\lambda_i = 4\pi\mu_i \Delta P_i / (\xi P_0)$; ξ – коефіцієнт кінцевих ефектів.

Концентрація *i*-го компонента синтезованої суміші визначається залежністю

$$r_i = \sum_{\{j_i\}} G_{i,j_i} / \sum_{i=1}^N \sum_{\{j_i\}} G_{i,j_i}, \tag{3}$$

де $\{j_i\}$ – вибірка елементів множини $\{1, \dots, n_i\}$, тобто індексів залучених капілярів *i*-го пакета.

Блок стабілізованих тисків живлення

Блок стабілізованих тисків живлення (див. рис. 2) утворений із *K* каскадно з'єднаних подільників тиску, кожен з яких складається із M_k капілярів. Подільники з'єднані так, що кожен наступний подільник ділить перепад ($P_{k-1,1} - P_0$) на останньому капілярі попереднього подільника, тобто $P_{k,M_k} = P_{k-1,1}$ ($k=2, \dots, K$), оскільки виходи усіх подільників з'єднані між собою і перебувають під однаковим тиском P_0 . Тиск P_{1,M_1} підтримують постійним за допомогою стабілізатора надлишкового тиску C_1 , тиски $P_{2,M_2}, \dots, P_{K,M_K}$ підтримують постійними за допомогою вищеописаних систем повторення тисків ПП₂, ..., ПП_K, а тиск P_0 на виході подільників стабілізатором абсолютного тиску C_0 .

Основною перевагою такої системи є можливість одночасного задання великої кількості суттєво різних за значенням стабілізованих тисків (перепадів), а лінійність капілярів подільників забезпечує пропорційну зміну усіх міждросельних тисків при зміні завдання стабілізатору C_1 , чи внаслідок нестабільності роботи стабілізатора.

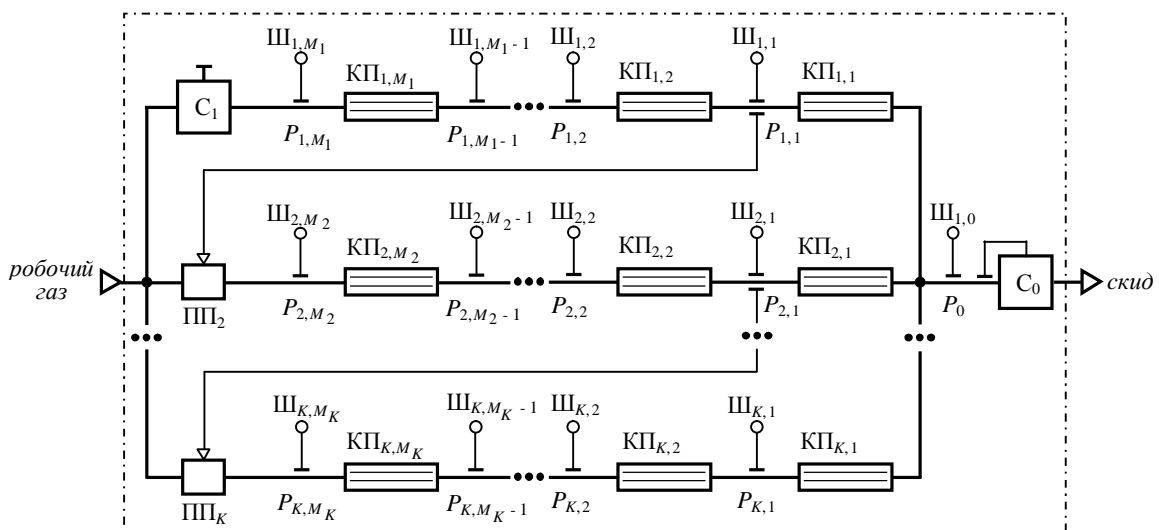


Рис.2. Узагальнена принципова схема блоку задання стабілізованих тисків живлення ГДС.

ПП_k – повторювач тиску; КП_{k,m} і P_{k,m} – *m*-й капіляр *k*-го подільника і тиск на вході цього капіляра; C₀ – стабілізатор тиску P₀; C₁ – стабілізатор (задавач) тиску; Ш_{k,m} – штуцери

Визначення геометричних розмірів прохідних каналів блоку стабілізованих тисків живлення із заданими значеннями міждросельних тисків відбувається у два етапи.

На першому з них визначають розміри вихідних капілярів $KП_{k,1}$ усіх подільників, тобто $\tilde{d}_{k,1}$ і $\tilde{l}_{k,1}$. Для цього задають один з розмірів (переважно діаметри) і з допомогою умови лінійності витратної характеристики капіляра [5, 7] визначають другий (переважно довжини).

На другому етапі визначають розміри ($\tilde{d}_{k,m}$, $\tilde{l}_{k,m}$) прохідних каналів решти капілярів $KП_{k,m}$ ($m=2, \dots, M_k$) усіх каскадів блоку стабілізованих тисків живлення з допомогою системи рекурентних залежностей, отриманих з витратної характеристики капіляра і умови її лінійності [5, 7]:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{d}_{k,m+1} &= D_{k,m} / g_{k,m+1}; \\ \tilde{l}_{k,m+1} &= L_{k,m} / y_{k,m+1}; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де $k = \overline{1, K}$; $m = \overline{1, M_k - 1}$; $D_{k,m} = \left[\sum_{p=1}^m \tilde{d}_{k,p}^{-4} \right]^{-1/4}$; $g_{k,m+1} = [D_{k,m}^2 - 1]^{1/4}$; $D_{k,m} = \frac{\Delta P_{k,m+1}}{\Delta P_{k,m}}$;

$\Delta P_{k,m} = P_{k,m} - P_0$; $L_{k,m} = \omega D_{k,m}^2$; $\omega = P_0 \sqrt{\xi X}$; $y_{k,m+1} = D_{k,m} + 1$.

Синтезатор для діагностування сигналізатора СО

Прикладом застосування розроблених нами принципів є синтезатор (див. рис.3) для приготування двох бінарних газових сумішей «чадний газ-повітря» з мікроконцентраціями СО, призначений для діагностування справності сигналізатора. Одна газова суміш має концентрацію r_{1-} (% об.) СО меншу за допустиму $r_{1\text{дон}}$, а інша r_{1+} – більшу, тобто $r_{1-} = 0,002 < r_{1\text{дон}} = 0,005 < r_{1+} = 0,008$. У разі подання першої газової суміші справний сигналізатор не повинен видати сигналу небезпеки, а при поданні другої – сигналізувати про перевищення допустимого значення концентрації.

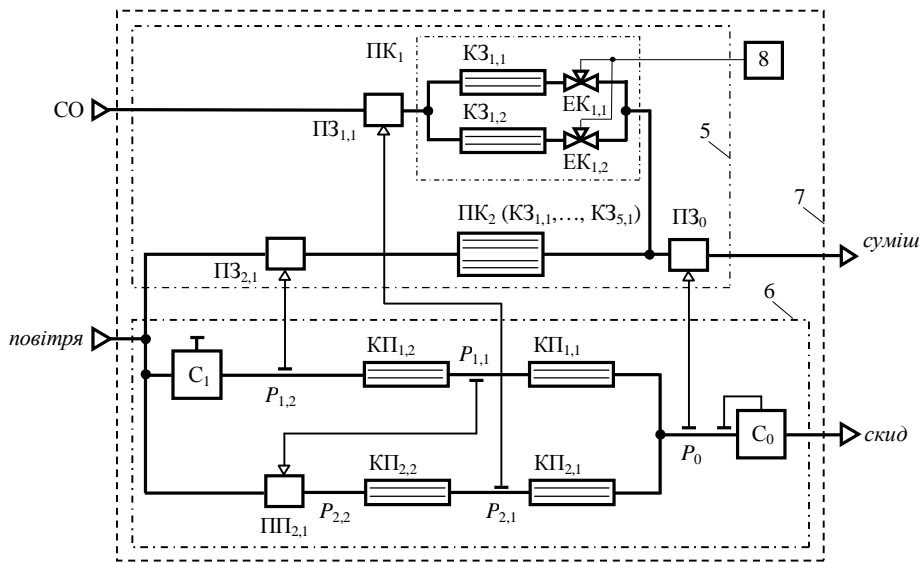


Рис. 3. Принципова схема ГДС для приготування перевірювальних газових сумішей «чадний газ-повітря» (умовні позначення відповідають рис. 1 і рис. 2)

Схема ГДС за рис. 3 відповідає узагальненим принципівим схемам рис. 1 і рис. 2 для отримання двох концентрацій СО – $r_{1-} = 0,002\%$ (20 ppm) і $r_{1+} = 0,008\%$ (80 ppm) в бінарній ($N=2$) суміші СО-повітря на виході синтезатора. У цьому синтезаторі для отримання r_{1-} з допомогою клапана $EК_{1,1}$ має бути залучений капіляр $KЗ_{1,1}$, а для r_{1+} з допомогою $EК_{1,2}$ – капіляр $KЗ_{1,2}$. Оскільки для $r_{1-} = 0,002\%$ витрати компонентів мають відрізнятися у $\sim 5 \cdot 10^4$ раз, то перепад на пакеті $ПК_1$ є у сотні раз меншим від перепаду на пакеті $ПК_2$, що забезпечується блоком стабілізованих тисків живлення, який складається з двох каскадно з'єднаних подільників. Крім того, для забезпечення потрібного співвідношення витрат пакет $ПК_2$ містить п'ять капілярів постійного опору (без електроклапанів).

Параметри змішувача і подільника, отримані з допомогою залежностей (1)-(4), наведені у таблицях.

Таблиця 1

Параметри капілярів змішувача та їх режимів роботи

Компонент	i	Δp_i , кПа	$ПК_i$	$KЗ_{i,j}$	n_i	$d_{i,j}$, мм	$l_{i,j}$, мм
СО	1	0,1	$ПК_1$	$KЗ_{1,1}$	1	0,064	6,66
				$KЗ_{1,2}$	1	0,128	26,98
Повітря	2	47	$ПК_2$	$KЗ_{2,1}, \dots, KЗ_{2,5}$	5	0,293	137,90

Параметри капілярів блоку стабілізованих тисків живлення та їх режимів роботи

Номер каскаду	Тиски в каскадах, кПа			Розміри КП, мм		
	$P_{k,2}$	$P_{k,1}$	P_0	КП $_{k,m}$	\tilde{d} , мм	\tilde{l} , мм
1	-	122,1	120	КП $_{1,1}$	0,305	149,71
	167	122,1	-	КП $_{1,2}$	0,0645	6,4
2	-	120,1	120	КП $_{2,1}$	0,305	149,71
	122,1	120,1	-	КП $_{2,2}$	0,066	6,8

Точну підгонку (градування) капілярних елементів можна здійснити за допомогою високоточного плівкового витратоміра, сумарна похибка вимірювання якого не перевищує 0,15 % [7]. Відносна похибка концентрацій СО на виході синтезатора з урахуванням похибки плівкового витратоміра і впливу завод не перевищує 0,5 %, а відтвораність – 0,05 %.

Висновки

1. Сформульовані нові принципи побудови ГДС високоточних складних сумішей з мікроконцентраціями окремих компонентів.
2. Розроблений багатокаскадний подільник тиску для задання суттєво різних перепадів тисків на дозуючих капілярах змішувача.
3. Розроблений синтезатор для діагностування справності сигналізатора чадного газу.

Література

1. 6th International Symposium Gas Analysis & Exhibition (GAS 2011) 9–11 February 2011 – Beurs-WTC Rotterdam. Режим доступу: <http://www.gas2011.org/publicaties/4324>.
2. J.A. McLean, G. Tobin. Animal and Human Calorimetry. 1st Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1988. – 338 p.
3. Gary O. Nelson. Gas mixtures: preparation and control. Lewis Publishers, 1992. – 294 p.
4. Рейман Л.В. Техника микродозирования газов (Методы и средства для получения газовых смесей) : [пособие] / Рейман Л.В. – Л.: Химия, 1985. – 224 с.
5. Теплюх З.М. Принципи побудови високоточних дросельних синтезаторів газових сумішей / З.М.Теплюх // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Автоматика, вимірювання та керування". – 2006. – № 551. – С. 87–94.
6. Ділай І.В. Наближення температурної залежності в'язкості поширених газів для умов лабораторних приміщень / І.В. Ділай, З.М. Теплюх // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація". – 2005. – № 537. – С. 161–165.
7. Ділай І.В. Побудова подільників тиску для живлення газодинамічних дросельних синтезаторів / І.В. Ділай, З.М. Теплюх // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація". – 2009. – № 659. – С. 120–128.
8. ПДГ. Повторитель давления газа. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.npro-groma.ru/katalog/techpribor/15401/?pos=432876>
9. Прохоров В.А. Основы автоматизации аналитического контроля химических производств / Прохоров В.А. – М. : Химия, 1984. – 320 с.

References

1. 6th International Symposium Gas Analysis & Exhibition (GAS 2011) 9–11 February 2011 – Beurs-WTC Rotterdam. URL: <http://www.gas2011.org/publicaties/4324>.
2. J.A. McLean, G. Tobin. Animal and Human Calorimetry. 1st Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1988. – 338 p.
3. Gary O. Nelson. Gas mixtures: preparation and control. Lewis Publishers, 1992. – 294 p.
4. Rejman L.V. Tekhnika mikrodozirovaniya gazov (Metody i sredstva dlya poluchniya gazovyx smesej): spr.posobie. Leningrad, Ximiya, 1985, 224 p. [in Russian]
5. Teplukh Z.M. Prynyspy pobudovy vysokotochnykh droselnykh syntezyatoriv hazovykh sumishei, Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika" "Avtomatyka, vymirivannia ta keruvannia", 2006, Vol.551, pp.87–94. [in Ukrainian]
6. Dilai I.V., Teplukh Z.M. Nablyzhennia temperaturnoi zalezhnosti viazkosti poshyrenykh haziv dlia umov laboratornykh prymishchen, Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika" "Teploenerhetyka. Inzheneriia dovkillia. Avtomatyziatsiia", 2005, Vol.537, pp.161-165. [in Ukrainian]
7. Dilai I.V., Teplukh Z.M. Pobudova podilnykiv tysku dlia zhyvlennia hazodynamichnykh droselnykh syntezyatoriv, Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika" "Teploenerhetyka. Inzheneriia dovkillia. Avtomatyziatsiia", 2009, Vol.659, pp.120–128. [in Ukrainian]
8. PDH. Povtorytel` davleniya gaza. URL: <http://www.npo-proma.ru/katalog/techpribor/15401/?pos=432876>
9. Prokhorov V.A. Osnovy avtomatyziatsyy analytycheskoho kontrolya ximicheskix proizvodstv. Moscow, Ximiya, 1984, 320 p. [in Russian]

Рецензія/Peer review : 8.5.2013 p. Надрукована/Printed : 16.6.2013 p.

Рецензент: д.т.н., професор, завдувач кафедри ТТЕС Національного університету «Львівська політехніка» Мисак Й.С.