

**Національний університет “Львівська політехніка”**

На правах рукопису

***ДІЛАЙ Ігор Володимирович***

**УДК 543.27**

**Розвиток газодинамічного методу та високоточних систем  
для приготування складних сумішей з  
мікроконцентраціями компонентів**

*Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю  
та визначення складу речовин*

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Львів - 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор  
**Теплюх Зеновій Миколайович**, професор кафедри  
«Автоматизація теплових та хімічних процесів»  
Національного університету «Львівська політехніка».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Древецький Володимир Володимирович**, завідувач  
кафедри «Автоматизація, електротехнічні та  
комп'ютерно-інтегровані технології» Рівненського  
національного університету водного господарства та  
природокористування;

доктор технічних наук, професор  
**Петрук Василь Григорович**, завідувач кафедри  
«Екології та екологічної безпеки» Вінницького  
національного технічного університету;

доктор технічних наук, с.н.с.  
**Тетерко Анатолій Якович**, провідний науковий  
співробітник відділу «Фізико-математичні основи  
неруйнівного контролю та технічної діагностики»  
Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка  
Національної Академії наук України.

Захист відбудеться «15» травня 2015 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д **35.052.04** у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 51 Х навчального корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (Львів, вул. Професорська,1).

Автореферат розісланий «\_\_» квітня 2015 р.

Відгуки надсилати за адресою : 79013, Львів-13, вул.С.Бандери,12

*Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради, к.т.н., доцент*



Вашкурак Ю.3.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Газові суміші використовують практично у всіх галузях людської життєдіяльності, серед яких: техніка (суміші для наповнення ламп розжарення, зварювальні суміші), охорона здоров'я і забезпечення життєдіяльності (анестезуючі та дихальні суміші), харчова промисловість (консервуючі суміші), біотехнології (суміші для вирощування штамів мікроорганізмів), хімія, мікроелектроніка, науково-дослідна робота, а особливо метрологічна атестація газоаналітичних засобів.

Як правило, всі технологічні суміші є багатокомпонентними і з мікроконцентраціями окремих компонентів. У той же час більшість методів і засобів зорієнтовані на одержання бінарних сумішей, що не забезпечує належного відтворення технологічних газових сумішей. Такий стан зумовлений високою складністю, а, часом, і неможливістю приготування газових сумішей відповідного складу, і, в першу чергу, через те, що більшість застосовуваних методів є статичними.

Особливі труднощі виникають з приготуванням перевірювальних сумішей для газоаналітичної апаратури, де потрібна висока точність задання і підтримання концентрації компонентів. Значна кількість таких газових сумішей потрібна, зокрема, в енергетичній галузі та охороні довкілля.

Теплоенергетичні підприємства (серед яких теплові електричні станції, котельні, випалювальні печі тощо) часто працюють не в оптимальних режимах через недостатню точність вимірювань, наприклад, концентрації компонентів природного та димових газів. Як свідчить світовий досвід, хроматографічний метод є найперспективнішим для аналізу таких складних газових середовищ, які зокрема, містять компоненти на рівні мікроконцентрацій. Проте поширенню цього методу перешкоджає відсутність багатокомпонентних газових сумішей з керованими мікроконцентраціями компонентів. Перспективним вирішенням цієї проблеми є застосування газодинамічного дросельного методу, який дотепер відомий, як правило, для одержання сумішей з макроконцентраціями компонентів.

Такий стан приготування газових сумішей впливає також з результатів досліджень вітчизняних і зарубіжних вчених, зокрема: Г.Нельсона, Л.В.Реймана, Д.К.Коллерова, З.М.Теплюха, М.С.Рожнова, В.П.Приміського, Д.О.Горелика, Л.А.Конопелька, Е.А.Хацкевича.

Таким чином, розроблення науково обґрунтованих методів і засобів одержання складних газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів є актуальним.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі «Автоматизація теплових та хімічних процесів» Національного університету «Львівська політехніка» у рамках її основного наукового напрямку – «Вдосконалення і розробка елементів і підсистем збору та первинної обробки інформації в АСУТП».

Оснoву роботи складають результати досліджень, одержаних здобувачем під час виконання таких госпдоговірних робіт:

«Підвищення ефективності роботи котлів за рахунок вдосконалення хроматографічного методу» (Договір № 0161 від 09.07.2007 р.);

«Газодинамічні синтезатори для калібрування засобів аналітичної апаратури в теплоенергетиці» (Шифр № 2009-29 від 20.10.2009 р.), в яких здобувач був відповідальним виконавцем.

**Мета та задачі дослідження.** Мета роботи – теоретичне обґрунтування та експериментальне підтвердження можливостей газодинамічного методу у приготуванні складних сумішей з мікроконцентраціями компонентів та розроблення систем синтезу таких сумішей.

Для досягнення поставленої мети необхідним є розв’язання таких завдань:

- проаналізувати відомі методи та засоби приготування (синтезу) газових сумішей з малими та мікроконцентраціями компонентів і показати актуальність зменшення похибки задання і підтримання концентрацій компонентів газових сумішей;

- розробити і обґрунтувати концепцію побудови систем для приготування багатокомпонентних сумішей з мікроконцентраціями компонентів на основі дросельного методу дозування компонентів;

- розробити і дослідити базові дросельні схеми систем синтезу, побудовані на капілярних елементах, одержати їх математичні моделі та розробити схеми, які можуть забезпечити приготування з високою точністю складних сумішей з мікроконцентраціями компонентів;

- розробити методи і засоби для побудови дросельних елементів з точно заданим співвідношенням їх опорів на суттєво різних перепадах тисків; розробити методи і засоби підбору камер з різним співвідношенням об’ємів без вимірювань абсолютних розмірів; розробити та удосконалити математичні моделі газодинамічних засобів для підбору дроселів на різних перепадах тисків з метою забезпечення мінімальної похибки підбору;

- розробити математичні моделі газодинамічних капілярних задавачів витрат і тисків живлення для оптимізації їх схем і мінімізації впливу зовнішніх факторів;

- розробити принципи побудови газодинамічних систем синтезу газових сумішей з малими та мікроконцентраціями компонентів, які забезпечують високі метрологічні та експлуатаційні характеристики, зокрема зменшення похибки задання та підтримання концентрацій компонентів сумішей.

**Об’єкт дослідження** – процес приготування складних газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів та дозування і стабілізація потоків різних газів.

**Предмет дослідження** – газодинамічний метод і засоби синтезу складних багатокомпонентних газових сумішей у діапазоні мікроконцентрацій компонентів; капілярні дозуючі елементи та базові дросельні схеми розроблюваних газодинамічних систем синтезу; газодинамічний опір капілярів та пристрої для його відтворення на різних перепадах тисків.

**Методи дослідження.** Методологія та методи дослідження ґрунтуються на застосуванні теоретичних положень газодинаміки та експериментальних методів дослідження дозуючих дросельних елементів, числових методів для моделювання газодинамічних систем, а також математичної статистики та експериментальних методів для перевірки адекватності одержаних моделей з використанням пакетів Matlab, Maple.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-прикладну проблему – синтез високоточних систем неперервного приготування складних газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів на основі розвитку газодинамічного методу, що стало можливим завдяки новій концепції, суть якої полягає в дозуванні компонентів за допомогою дроселів з суттєво різними (наприклад на рівні трьох порядків) співвідношеннями опорів і перепадами тисків на них, а також розробленню нових методів компенсації факторів впливу. При цьому отримано такі нові наукові результати:

- вперше розроблено метод синтезу газових сумішей з мікроконцентраціями окремих компонентів на основі дозування компонентів з суттєво різними співвідношеннями опорів дроселями, на яких підтримуються суттєво різні перепади тиску залежно від концентрації відповідного компонента в суміші, що забезпечило побудову високоточних газодинамічних систем приготування складних газових сумішей та їх атестацію за співвідношенням провідностей;
- вперше розроблений газодинамічний метод синтезу газових сумішей, який полягає у розділенні каналів дозування компонентів дроселями і задання тисків на них, де в каналах дозування тиски на дросельних елементах відтворюються від окремого каналу (кола) задання стабілізованих тисків, що підвищило стабільність та відтворюваність складу синтезованих сумішей;
- вперше розроблена система синтезу складних газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів на основі поєднання змішувача на лінійних дозуючих капілярах і багатоелементної лінійної схеми задання тисків, що забезпечує компенсацію можливих змін тисків;
- вперше розроблено високоточний метод задання поділу тисків у багатокапілярній схемі, який полягає у зведенні в динамічному режимі до нуля перепаду тисків у двох гілках диференційної схеми з ланками «капіляр-камера», що забезпечує можливість задання кратних і суттєво різних перепадів тисків на капілярах схеми;
- вперше розроблені багатокапілярні схеми високоточного поділу тисків на основі каскадного з'єднання подільників і на основі комбінації подільників тисків з подільниками і суматором потоків, які забезпечили пропорційність зміни усіх міждросельних тисків при ймовірних змінах тиску живлення схеми;
- вперше введене і обґрунтоване поняття еквівалентного дроселя для газодинамічних схем (зокрема паралельного і послідовного з'єднання капілярів), що забезпечило моделювання і розрахунок складних дросельних схем синтезу сумішей;

- набув розвитку метод і вдосконалені засоби встановлення рівності та кратності опорів і провідностей капілярів, перепади тисків на яких є суттєво різними, що ґрунтуються на зведенні до нуля перепаду тисків у двох гілках диференційної схеми на основі ланок «капіляр-камера» з різними за об'ємом камерами і тисками на кінцях досліджуваних капілярів в динамічному режимі, що дало можливість, щонайменше, на порядок зменшити похибку приготування складних газових сумішей;
- набув розвитку метод і розроблені засоби підбору камер з різним співвідношенням об'ємів без вимірювань абсолютних розмірів, які ґрунтуються на зведенні до нуля перепаду тисків у камерах диференційної схеми з лінійними капілярами кратних опорів, що забезпечує зменшення похибки визначення заданого співвідношення об'ємів;
- набув розвитку метод приготування газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів, який ґрунтується на застосуванні капілярів з кратними опорами для компонентів з мікроконцентраціями і кратними провідностями для компонентів з макроконцентраціями, що відкрило можливість отримувати суміші з меншою на порядок похибкою задання та відтворення концентрацій їх компонентів атестацією за співвідношенням опорів.

**Практичне значення одержаних результатів.** Виконані теоретичні та експериментальні дослідження забезпечили перспективу побудови газодинамічних систем на основі дозуючих дроселів з суттєво різними газодинамічними провідностями (опорами) і перепадами тисків, зокрема, для розроблення газодинамічних синтезаторів, призначених для приготування складних газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів. Експериментальними дослідженнями і впровадженням підтверджені переваги розроблених методів і пристроїв:

- забезпечення компенсації впливу змін тисків на точність підтримання мікроконцентрацій компонентів;
- для одержання багатоконцентних газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів на одній стадії розчинення;
- можливість забезпечення високої точності задання і підтримання мікроконцентрацій компонентів;
- можливість атестації синтезованих газових сумішей за відношенням провідностей і перепадів тисків.

Розроблені синтезатори для калібрування газоаналізатора контролю чистоти аргону, перевірки системи попереджувальної та аварійної сигналізації витоків метану в приміщеннях автогазонаповнювальних компресорних станцій, а також для діагностування сигналізатора чадного газу в побутових приміщеннях.

За одержаними результатами роботи створені газодинамічні синтезатори, які впроваджені на Добротвірській ТЕС, зокрема, синтезатор для перевірки хроматографа димових газів котлоагрегатів. Впровадження синтезатора для калібрування хроматографів димових газів забезпечило зменшення похибки визначення концентрації компонентів у декілька раз (залежно від конкретних

умов), а також зростання ефективності роботи котлоагрегату. Очікуваний річний економічний ефект від впровадження таких синтезаторів в Україні складає близько 500 тис. грн.

Основні положення роботи доцільно використати у навчальних дисциплінах, зокрема: «Метрологія, технологічні вимірювання та прилади», «Основи наукових досліджень та організація науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт», а також для підготовки магістрів за напрямом «Автоматизоване управління технологічними процесами і виробництвами».

**Особистий внесок здобувача.** Основні ідеї та наукові результати дисертації розроблено автором особисто. В роботах із співавторами дисертантові належить постановка задач, участь у теоретичних і експериментальних дослідженнях, розроблення нових методів і засобів, а також реалізація результатів досліджень. Внесок дисертанта при цьому був визначальним.

У працях, опублікованих у співавторстві, автору належать:

[3, 6] – введення і застосування поняття рівності газодинамічного опору дроселів; [6] – встановлення рівності опорів капілярів на одному та різних газах; [3] – метод приготування газових сумішей з мікроконцентраціями; [3, 37] – поєднання змішувача компонентів на лінійних капілярах тисків і багатоелементного лінійного подільника тисків; [10, 11, 12, 33] – розроблення багатоелементних подільників тиску, поєднання із змішувачем потоків, поняття еквівалентного дроселя; [14, 15, 18, 20, 21, 22, 36] – уточнені математичні моделі систем синтезу; [5, 7, 8, 9, 24, 26, 28, 34] – дослідження чутливості мостових дросельних схем; [3, 6] – встановлення рівності газодинамічних опорів; [16, 23, 25] – розроблення газодинамічних задавачів витрати; [29, 30, 31, 35] – розроблення систем синтезу для перевірки газоаналітичної апаратури; [4, 13, 19, 27] – принципи побудови газодинамічних систем синтезу; [14, 16, 20, 21, 23, 32] – вдосконалення засобів калібрування дроселів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи оприлюднені на 38 науково-технічних конференціях, симпозиумах, семінарах, зокрема на міжнародних: Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційно-комп'ютерні технології в освіті, науці та виробництві: теорія, методологія, досвід в підготовці інженерних кадрів; основні засади автоматизованого управління виробничими процесами», 2007 р. Луцьк; XV Міжнародний семінар метрологів «Методи і техніка перетворення сигналів при фізичних вимірюваннях», 2007 р., Ряшів-Львів; III Міжнародна науково-технічна конференція «Світлотехніка й електротехніка: історія, проблеми й перспективи», 2008 р., Тернопіль; Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Наукові дослідження та їх практичне застосування. Сучасний стан і шляхи розвитку '2008», 2008 р., Одеса; IV Міжнародна науково-технічна конференція «Датчики, прилади та системи – 2008», 2008 р., Ялта; V Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми економії енергії», 2008 р., Львів; 5-а Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні прилади, матеріали і

технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання», 2008 р., Івано-Франківськ; VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2009: стан і перспективи», 2009 р., Київ; I Міжнародний конгрес «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», 2009 р., Львів; 2-а міжн. наук.-пр. конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ПРТК-2009)», 2009 р., Київ; 5-а міжн. наук.-практична конференція «Наукові дослідження – теорія та експеримент 2009», 2009 р., Полтава; Міжн. наукова конф. «Іван Фещенко-Чопівський: вчений і патріот», 2009, Львів; 4-а Міжн. н.-т. конференція «Сучасні комп'ютерні системи та мережі: розробка та використання». ACSN'2009, 2009 р., Львів; 5-а Міжн. науково-практична конференція «Розвиток наукових досліджень – 2009», 2009 р., Полтава; 9-а Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2010: стан і перспективи», 2010 р., Київ; Третя міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робото технічні комплекси (ПРТК)», 2010 р., Київ; X Міжнародна конференція «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2010)», 2010 р., Вінниця; Шоста міжнар. науково-практична конференція «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні», 2011 р., Львів; XVII International Conference «Problems of decision making under uncertainties (PDMU-2011)», 2011, Ukraine; ХУІІІ Міжн. конф. з автоматичного управління. «Автоматика /Automatics – 2011», 2011 р., Львів; ХІ Міжн. наук.-техн. конференція «Приладобудування: стан і перспективи», 2012 р., Київ; ХІ Міжн. конф. «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)», 2012 р., Вінниця; ХІІ Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи», 2013 р., Київ.

**Публікації.** Всього за тематикою дисертації опубліковано 74 наукових роботи, з яких: 23 статті у фахових наукових журналах (серед них – 3 у виданнях, які входять в міжнародну наукометричну базу і одна у зарубіжному науковому виданні), 51 у збірниках матеріалів і тез н/т конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота містить вступ, 5 розділів з підсумками, загальні висновки, перелік використаних джерел і додатки. Робота викладена на 291 сторінці, з яких 233 основного тексту і містить 70 рисунків, 17 таблиць, 247 найменувань джерел.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, мета та задачі досліджень, наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, представлені основні результати та положення, які дисертант подає до захисту.

**У першому розділі** проаналізований існуючий стан і перспективи розвитку методів і засобів одержання складних газових сумішей з мікроконцентраціями



компонентів і показано, що на основі газодинамічного дросельного методу можна розв'язати поставлені науково-прикладні завдання.

Дотепер задачі одержання газових сумішей вирішують для кожного конкретного застосування, як правило, традиційно, тобто статичними методами, що зв'язано з низкою недоліків, зокрема періодичністю приготування сумішей в балонах і, як правило, недостатньою точністю приготування сумішей, що можна синтезувати лише в умовах спеціалізованих лабораторій з наявністю високопрофесійних спеціалістів і унікального обладнання.

Найбільш відомими статичними методами є метод парціальних тисків і ваговий. Проте необхідність високоточного визначення тисків, об'ємів, температур компонентів газових сумішей, а особливо розрахункового визначення концентрацій одержаних сумішей (внаслідок недосконалості рівнянь стану) обмежує можливості методу парціальних тисків у приготуванні високоточних газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів. Ваговий метод попри високі потенційні можливості не набув широкого поширення в промисловості через складність процедури приготування сумішей (необхідність високоточних вимірювань малих змін маси газових компонентів в балонах), необхідності високої технологічної культури, а тому його застосовують, як правило, в лабораторних умовах для одержання незначної кількості сумішей.

Аналіз методів і засобів приготування сумішей заданого складу з мікроконцентраціями компонентів також показав, що динамічні методи мають низку переваг і найперспективнішим серед них є газодинамічний дросельний метод.

Складність процесу приготування газових сумішей з низькими концентраціями компонентів статичним (об'ємним) і динамічним методами продемонстрована таблицею для п'яти діапазонів шириною 1:100, в якій наведені відповідні значення об'ємів і витрат, що необхідно відповідно відміряти і задати для одержання сумішей.

Як видно з таблиці, для приготування 10 л суміші з мікроконцентраціями компонентів в діапазоні  $[10^{-4} \dots 10^{-2}]$  % статичним методом необхідно відміряти в окремій камері  $[10^{-5} \dots 10^{-3}]$  л визначуваного компонента і змішати з газом-розчинником. Вимірювання малих об'ємів (тисячні частки л) за даними досліджень ВНИИМ (Санкт-Петербург, Росія) здійснюють з похибкою на рівні 1 %, похибки вимірювань більших об'ємів складають 0,2 %. Отже, вже при вимірюванні (калібруванні) об'ємів виникають похибки на рівні кількох відсотків. Крім цього, похибки концентрації компонентів в суміші зростають, зокрема, через наявність паразитних об'ємів при змішуванні компонентів, їх дифузії через стінки камер, можливість конденсації окремих компонентів на стінках тощо.

Приготування газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів динамічним методом, як видно з таблиці, потребує задання об'ємної витрати визначального компонента на рівні  $10^{-4} \dots 10^{-2}$  л/год. Похибка вимірювання витрат

в цьому діапазоні значень, наприклад, з використанням плівкового витратоміра може сягати 5 %.

Таблиця

Діапазони концентрацій компонентів сумішей і особливості їх приготування об'ємним і динамічним методами

Назви діапазонів	Концентрації компонентів					Дані для синтезу суміші об'ємним і динамічним методами	
	Абсолютне значення	Доцільні одиниці				Об'єм компонента в 10 л суміші	Витрата компонента для 100 л/год суміші
		% об.	‰ об.	ppmv	ppmb		
макро (великі)	$10^{-2} \dots 1$	1...100				0,1...10 л	1...100 л/год
мілі (середні)	$10^{-4} \dots 10^{-2}$	0,01...1	0,1...10			1...100 см <sup>3</sup>	0,01...1 л/год
мікро (малі)	$10^{-6} \dots 10^{-4}$			1...100		0,01...1 см <sup>3</sup>	0,1...10 см <sup>3</sup> /год
нано (надмалі)	$10^{-8} \dots 10^{-6}$			0,01...1	$10 \dots 10^3$	0,1...10 мм <sup>3</sup>	1...100 мм <sup>3</sup> /год
сліди	$<10^{-8}$				$<10$	0,1 мм <sup>3</sup>	$<1$ мм <sup>3</sup> /год

Отже приготування газових сумішей з використанням операцій вимірювання витрат і об'ємів не забезпечує високоточного задання та підтримання вмісту сумішей з мікроконцентраціями компонентів.

Виконаними дослідженнями встановлено, що приготування за допомогою газодинамічних синтезаторів сумішей з мікроконцентраціями компонентів при залученні рівноопорових (або з кратними опорами) дозуючих капілярів на одному перепаді тисків потребує значної кількості (сотні чи десятки) капілярів, що практично унеможлиблює технічну реалізацію таких засобів синтезу.

На основі виконаного аналізу і досліджень нами запропонована концепція розвитку газодинамічного методу приготування сумішей з мікроконцентраціями компонентів, пов'язана із заміщенням вимірювань витрат в діапазоні  $10^{-6} \dots 100$  л/год встановленням відповідної кратності провідностей дозуючих дроселів і суттєво різних перепадів тиску на них. Ця концепція має за мету підвищення точності на кілька порядків і вимагає ґрунтовного дослідження дроселів і схем на їх основі, зокрема розроблення засобів встановлення заданої кратності провідностей дозуючих дроселів і заданих різних перепадів тиску на них.

**У другому розділі** досліджено існуюче розмаїття дросельних елементів та запропонована їх класифікація за характером дозованого потоку. Кожен із відомих типів дросельних елементів (ламінарі, турбулентні, комбіновані) має свою переважну область застосування, проте щодо продукування складних газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів найперспективнішими є постійні дроселі, які забезпечують ламінарний режим ( $Re < 2320$ ) протікання дозованого газового потоку. Серед цього виду дроселів найперспективнішими є

скляні капілярні дросельні елементи з циліндричним прохідним каналом, оскільки вони можуть забезпечувати стабільність витратних характеристик. Важливою перевагою капілярів є те, що при дотриманні стабільних умов роботи (постійні абсолютний тиск на виході капіляра, температура дозованого середовища) і відповідному співвідношенні геометричних розмірів прохідного каналу вони забезпечують лінійність витратної характеристики. Крім цього, за наявності ступені свободи у скороченні одного із геометричних параметрів – довжини прохідного каналу капіляра, можна плавно змінювати його газодинамічний опір (провідність) в процесі підбирання рівнопорових капілярів.

Застосування капілярних елементів з лінійними витратними характеристиками забезпечує суттєве поліпшення метрологічних характеристик газодинамічних пристроїв (синтезаторів, блоків стабілізованих тисків живлення, задавачів витрати). У зв'язку з цим виконані теоретичні та експериментальні дослідження витратних характеристик капілярів і одержані адекватні залежності виду  $G(d, l, \Delta p, P_0, \xi, \mu(T), \rho, T)$ , де  $G$  – масова витрата газу;  $d, l$  – відповідно діаметр і довжина протічного каналу капіляра;  $\Delta p, P_0 (P_w)$  – відповідно перепад тиску на капілярі та абсолютний тиск на його виході;  $\xi$  – коефіцієнт кінцевих ефектів;  $\mu(T)$  – в'язкість при температурі  $T$ ;  $\rho$  – густина дозованого газу. Ці залежності забезпечили адекватне моделювання різних типів з'єднань капілярів (пакети капілярів, подільники тисків тощо) газодинамічних систем, зокрема і для приготування газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів. Виконання цих експериментальних досліджень вимагало вдосконалення відомих методів та засобів вимірювання малих і мікровитрат газів, зокрема вдосконалення роботи окремих вузлів (зокрема, мірних трубок) і розроблення системи керування пристроями на основі RISC-мікроконтролера. Узгоджена робота газових, рідинних, оптичних, теплових і мехатронних систем уможливила підвищення точності виконання вимірювань витрати (досягнуто похибки на рівні 0,1 %) та поліпшення експлуатаційних характеристик плівкового витратоміра.

Адекватне моделювання газодинамічних систем синтезу газових сумішей на основі капілярних елементів вимагає наближення температурної залежності в'язкості в умовах, які характерні для лабораторних приміщень (доволі вузький діапазон зміни температур 0...60 °С і тиск близький до атмосферного). Одержані апроксимаційні залежності, гранична похибка яких є меншою 1 %.

Одним з найважливіших параметрів, що визначає провідність капілярів є діаметр його прохідного каналу, оскільки він входить в математичну модель витратної характеристики в четвертій ступені і можливі відхилення у визначенні його значення призводять до значних похибок (на рівні десятків відсотків) задання витрати. Суттєву складність визначення діаметра спричиняє сам діапазон значень його внутрішнього каналу, який для капілярів, використовуваних у газодинамічних пристроях, складає  $d \in [0,05; 0,5]$  мм при конструктивно прийнятній довжині  $l \in [5; 150]$  мм. Крім того, значення внутрішнього діаметра капіляра часто не є постійним по довжині каналу і його відхилення від

номінального значення можуть складати на рівні десятка відсотків. Недоліки відомих способів визначення діаметра (ваговий, електролітичний, оптичний і пневматичний), які полягають, зокрема, у необхідності використання взірцевих засобів вимірювання малих мас, електропровідних розчинів високої чистоти, взірцевих капілярів не сприяють їх поширенню і спонукали до розроблення нами газодинамічного способу визначення середнього (ефективного) діаметра капіляра.

Одержана залежність визначення ефективного діаметра капіляра на основі багаторазових вимірювань в усьому інтервалі ламінарного режиму

$$d = \left[ 256 l \mu \pi^{-1} Q_i Q_j P_w (Q_i - Q_j) / (B_j Q_i^2 - B_i Q_j^2) \right]^{0,25}, \quad (1)$$

де  $Q_i$ ,  $Q_j$  і  $B_i$  і  $B_j$  – відповідно витрата газу через капіляр і комплекс тисків для  $i$ -ї та  $j$ -ї експериментально отриманих точок;  $B_i = (P_i^H + P_w)^2 - P_w^2$ ;  $P_i^H$  – надлишковий тиск на вході капіляра.

Оцінена похибка  $\delta_d^{zp}$  з використанням основних положень теорії похибок вимірювань, згідно з якими

$$\delta_d^{zp} = \sum_{p \in \{\mu, l, Q, P^H, P_w\}} |K_p| \delta_p, \quad (2)$$

де  $\delta_\mu = 1\%$ ,  $\delta_l = 0,02\%$ ,  $\delta_{Q_i} = \delta_{Q_j} = 0,2\%$ ,  $\delta_{P_i^H} = \delta_{P_j^H} = 0,16\%$ ,  $\delta_{P_w} = 0,2\%$  – граничні відносні похибки визначення відповідно: в'язкості, довжини прохідного каналу, об'ємних витрат, надлишкових на вході та абсолютного тиску на виході капіляра;  $K_\mu$ ,  $K_l$ ,  $K_{Q_i}$ ,  $K_{Q_j}$ ,  $K_{P_i^H}$ ,  $K_{P_j^H}$ ,  $K_{P_w}$  – коефіцієнти впливу, визначені з виразів:

$$\left. \begin{aligned} K_\mu &= \frac{\partial d}{\partial \mu} \frac{\mu}{d} = \frac{1}{4}; & K_l &= \frac{\partial d}{\partial l} \frac{l}{d} = \frac{1}{4}; & K_{P_w} &= \frac{\partial d}{\partial P_w} \frac{P_w}{d} = \frac{1}{4(\alpha-1)} \frac{q\beta_j - 1}{1 + 2\beta_w^{0,5}}; \\ K_{Q_i} &= \frac{\partial d}{\partial Q_i} \frac{Q_i}{d} = \frac{\alpha - 2q^{0,5} + 1}{4(\alpha-1)(q^{0,5} - 1)}; & K_{Q_j} &= \frac{\partial d}{\partial Q_j} \frac{Q_j}{d} = \frac{\alpha - 2\alpha q^{-0,5} + 1}{4(\alpha-1)(1 - q^{-0,5})}; \\ K_{P_i^H} &= \frac{\partial d}{\partial P_i^H} \frac{P_i^H}{d} = \frac{1 - (\beta_w^{0,5} + 2)^{-1}}{2(\alpha-1)}; & K_{P_j^H} &= \frac{\partial d}{\partial P_j^H} \frac{P_j^H}{d} = \frac{q\beta_j^{0,5} (\beta_w^{0,5} + 2)^{-1} - \alpha}{2(\alpha-1)}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де  $\alpha = Q_i^2 P_j^H (P_j^H + 2P_w) [Q_j^2 P_i^H (P_i^H + 2P_w)]^{-1}$ ;  $\beta_w = (P_w / P_j^H)^2$ ;  $\beta_j = (P_j^H / P_i^H)^2$ ;  $q = (Q_i / Q_j)^2$ .

Для прикладу значення граничної похибки, розрахованої за залежністю (2) для капіляра з розмірами прохідного каналу  $d=0,1$  мм і  $l=100$  мм при дозуванні ним азоту при  $T=293$  °С для пари заданих значень надлишкового тиску ( $P_i^H=90$  кПа і  $P_j^H=130$  кПа) складає  $\delta_d^{zp}=0,71\%$ , а із врахуванням часткової

компенсації систематичних похибок при вимірюванні тисків і витрат зменшується до  $\delta_d^{sp} = 0,62\%$ .

Функціональна залежність витратної характеристики капіляра містить також коефіцієнт  $\xi$  кінцевих ефектів, який введений для врахування особливостей протікання газу у початковій та кінцевій ділянках прохідного каналу капіляра. Проте наведені в різних джерелах значення коефіцієнта  $\xi$  дають значні розбіжності з експериментом.

Одержана залежність для визначення коефіцієнта  $\xi$  має вигляд

$$\xi = 8\pi l R_z \mu T (Q_j B_i - Q_i B_j) / [P_w (Q_i^2 B_j - Q_j^2 B_i)], \quad (4)$$

де  $R_z = R_\mu / M$  – газова стала;  $R_\mu$  – універсальна газова стала;  $M$  – молекулярна маса газу.

Аналогічно визначена за двома точками витратної характеристики гранична похибка коефіцієнта  $\xi$  складає  $\delta_\xi^{sp} \approx 11\%$ , а з врахуванням часткової компенсації систематичних похибок при вимірюванні витрат і тисків –  $\delta_\xi^{sp} \approx 9\%$ . Проте, незважаючи на таку велику похибку визначення коефіцієнта  $\xi$ , встановлено, що її внесок у похибку визначення витрати є на рівні 1%.

Визначена гранична похибка  $\delta_Q^{sp}$  витрати за похибками величин, які входять у математичну модель витратної характеристики капіляра складає  $\delta_Q^{sp} = 6\%$ , а середньоквадратична не перевищує 4%.

Встановлено, що найбільшу частку в похибку визначення витрати вносять похибки визначення  $d$ ,  $\mu$  і  $\xi$ . Значення похибок цих величин можна зменшити, зокрема, використанням точніших даних в'язкості газів, що зменшить похибки визначення  $d$  і  $\xi$ , а в кінцевому результаті – похибку визначення витрати.

**У третьому розділі** розроблені та досліджені в різних режимах роботи базові схеми газодинамічних систем синтезу: суматори і подільники потоків; подільники тиску (дво- і багатоеlementні, лінійні), каскадне з'єднання подільників тиску, паралельне з'єднання капілярів, пакети капілярів, комбіноване з'єднання капілярів і пакетів, пакетні подільники тиску, з'єднання подільників тиску з подільниками потоків і суматорами.

Базовою залежністю для побудови вищезгаданих з'єднань капілярів є витратна характеристика капіляра, яку доцільно представити у вигляді

$$G = A [(1 + YB)^{1/2} - 1], \quad (5)$$

де, крім відомих,  $A = a \cdot l = (4\pi\mu / \xi)l$  – коефіцієнт витрати;  $Y = K X$  – комплекс розмірів капіляра та параметрів дозованого потоку;  $K = \xi d^4 / l^2$  – комплекс розмірів капіляра;  $X = (512R_z T \mu^2)^{-1}$  – параметричний комплекс;  $B = P_v^2 - P_w^2$  – комплекс тисків;  $P_v$  – значення абсолютного тиску газу на вході капіляра.

Встановлено, що найбільші перспективи застосування мають капіляри з лінійними витратними характеристиками і кратними провідностями (опорами).

Математична модель з'єднання капілярів за схемою суматора потоків відображає функціональну залежність між теплофізичними параметрами газових компонентів ( $R_z, \mu, M$ ), геометрією прохідних каналів ( $d$  і  $l$ ) капілярів, параметрами режимів їх роботи ( $P_v, P_w, T$ ), параметрами оточуючого середовища (тиск і температура), а також концентраціями  $r$  компонентів синтезованої суміші.

Цей взаємозв'язок для суматора  $n$  газових потоків в загальному можна представити у вигляді системи рівнянь

$$\left. \begin{aligned} G_i &= f_i(d_i, l_i, P_{v_i}, P_{w_i}, R_{z_i}, \mu_i, M_i, T_i); \\ r_i &= G_i / \sum_{j=1}^n G_j; \\ \max(4G_i / (\pi \mu_i d_i)) &\leq 2320; \\ d_{\min} \leq d_i \leq d_{\max}; l_{\min} \leq l_i \leq l_{\max}; &i = \overline{1, n}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

де  $i$  – індекс відповідного компонента газової суміші;  $d_{\min}$ ,  $d_{\max}$  і  $l_{\min}$ ,  $l_{\max}$  – мінімальне і максимальне значення відповідного розміру прохідного каналу капіляра.

З метою розширення діапазону концентрацій компонентів синтезованих сумішей (тобто для приготування сумішей з мікро- і наноконцентраціями компонентів), газодинамічні синтезатори в окремих каналах суматора потоків містять з'єднання капілярів за схемою подільників потоків. Таке з'єднання забезпечує поділ вхідного потоку компонента суміші залежно від опору (провідності) кожної з галузок і подання відгалуженого потоку на наступну стадію розчинення.

Принципово новим в концепції побудови газодинамічних систем є застосування подільників тисків як джерела задання тисків живлення для змішувача газодинамічних синтезаторів. На основі виконаних досліджень багатокапілярних подільників тиску (рис. 1) встановлено, що в загальному характер залежності міждросельних тисків від зміни тиску  $P_n$  живлення на вході та фіксованому тиску на виході  $P_0$  є нелінійним і може бути визначений за рекурентною залежністю

$$P_i = \left( Y_i^{-1} \left\{ [G / A_i + 1]^2 - 1 \right\} + P_{i-1}^2 \right)^{1/2}, \quad (7)$$

де  $i = \overline{1, n-1}$  – індекс визначуваного міждросельного тиску подільника.

Подільники тисків можуть працювати в двох режимах: при стабілізованому і змінному вхідному тиску  $P_n$ . Перший режим доцільно застосовувати для роботи подільника як задавача тисків живлення газодинамічних пристроїв, зокрема, газодинамічних синтезаторів, а другий – у разі зміни витрат синтезованої суміші чи одночасної перевірки різнодіапазонних приладів вимірювання тисків.

Нову якість у побудові високоточних газодинамічних систем синтезу забезпечує багатоелементний лінійний подільник тисків (ПТ), який фактично поєднує обидва режими роботи подільників. Його застосування як основи блоку живлення газодинамічних систем синтезу дає можливість одночасної пропорційної зміни витрати всіх компонентів синтезованої суміші і тим самим зміни загальної витрати суміші при збереженні постійних значень концентрацій компонентів одержуваної суміші.

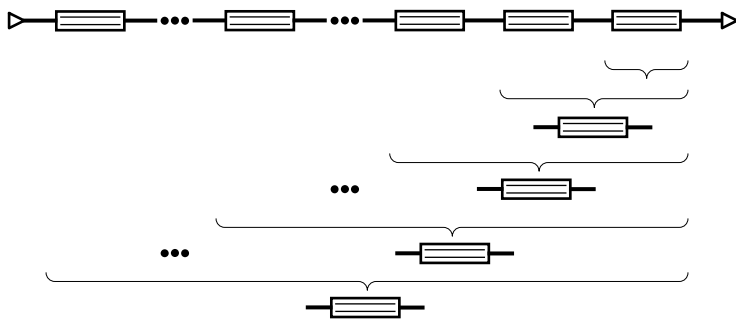


Рис. 1. Принципова схема багатокapілярного подільника тиску.  $K_1 - K_n$  – капіляри;  $P_0, P_n$  – тиски живлення подільника;  $P_1 - P_{n-1}$  – міждросельні тиски перед відповідними капілярами;  $K_{(2)} - K_{(n)}$  – еквівалентні капіляри, які замінюють відповідно 2, ..., n послідовно з'єднаних капілярів

Введене поняття еквівалентного дрoселя дало можливість отримання зручних у використанні рекурентних залежностей для визначення як діаметрів, так і довжин прохідних каналів капілярів лінійного подільника тисків.

Одержання таких функціональних залежностей базується на заміні будь-якого лінійного двоелементного подільника одним лінійним капіляром з використанням для цього отриманих залежностей для еквівалентних дрoселів. На рис. 1, продемонстрована така послідовна заміна подільників з метою визначення розмірів прохідних каналів капілярів  $n$ -елементного подільника. Так, в загальному, подільник складений з двох капілярів, в якому першим по ходу газу є капіляр  $K_j$  ( $j = \overline{2, n-1}$ ), а другим –  $K_{(j-1)}$ , замінюється еквівалентним дрoселем  $K_{(j)}$ .

Система рівнянь для визначення розмірів прохідних каналів усіх капілярів лінійного  $n$ -елементного подільника із заданими значеннями міждросельних тисків (коефіцієнтів поділу  $k_i = 1/\chi_i = (P_i - P_0) / \Delta P$ , де  $\Delta P = P_n - P_0$ ) має вигляд

$$\left. \begin{aligned} d_j &= d_{(j-1)} / g_j; \\ l_j &= l_{(j-1)} / y_j, \end{aligned} \right\} K_{(j)} \quad (8)$$

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

$D_{(j-1)} = D_{j-1} / D_j$ ;  $D_{j-1} = \Delta P / \Delta P_{j-1} = 1/k_{j-1}$ ;  $\Delta P_{j-1} = P_{j-1} - P_0$ ;  $\kappa = P_0 \sqrt{\xi X}$ .

Моделювання лінійних подільників тиску показало, що на одному ПТ можна досягнути значення коефіцієнта поділу до трьох десятків одиниць, проте для синтезу сумішей з вмістом компонентів близьким до нижньої межі мікроконцентрацій (1 ppm) потрібні коефіцієнти поділу на рівні тисяч.

Збільшення коефіцієнта поділу міждросельних тисків досягнуто завдяки побудові каскадного з'єднання лінійних ПТ (рис. 2) так, щоб реалізувати поділ

наступним подільником перепаду тиску на останньому капілярі попереднього подільника. Відтворення тисків на входах ПТ здійснюється за допомогою повторювачів  $\Pi_k$  тисків.

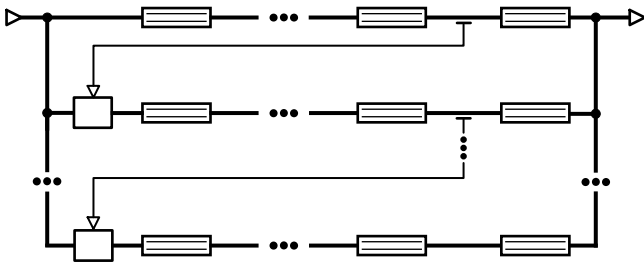


Рис. 2. Принципова схема каскадного з'єднання подільників тиску:  
 $\Pi_k$  – повторювач тиску на вході  $k$ -го подільника;  $K_{k,m}$  і  $P_{k,m}$  –  $m$ -й капіляр  $k$ -го подільника і тиск на вході цього капіляра

Таким чином, коефіцієнт поділу каскадного з'єднання лінійних ПТ складає  $\chi = \prod_{i=1}^n \chi_i < 30^n$ , де  $n$  – кількість подільників тиску у каскадному з'єднанні.

Побудована та досліджена дросельна схема (рис. 3), утворена поділом потоків (I) і тисків (II) з регулятором потоків (III), яка забезпечує задані значення постійних коефіцієнтів поділу тисків при можливій зміні тиску живлення. Розроблена схема не потребує залучення повторювачів тисків, що покращує метрологічні та експлуатаційні характеристики розроблених на її основі засобів стабілізації тисків.

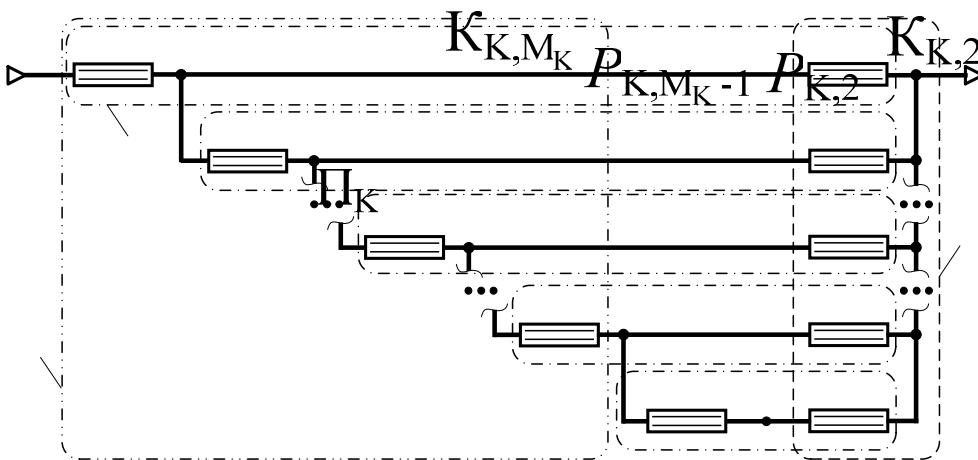


Рис. 3. Принципова дросельна схема, яка забезпечує одержання суттєво різних перепадів тисків з лінійною функцією їх зміни від тиску на вході

Проектування дросельної схеми передбачає визначення мінімальної кількості  $n$  каскадів схеми за залежністю

$$n = \left[ \ln \left( \Delta P_{\max} \Delta P_{\min}^{-1} \right) / \ln \chi_{1\max} \right] + 1, \quad (9)$$

де  $\Delta P_{\max}$ ,  $\Delta P_{\min}$  – відповідно задані максимальний і мінімальний перепади тисків з вектора заданих;  $\chi_{1\max}$  – максимальний коефіцієнт співвідношення перепадів на капілярах лінійного двоелементного ПТ. Квадратні дужки в залежності (9) означають цілу частину значення виразу.

Визначення параметрів прохідних каналів капілярів схеми, яка забезпечує постійні коефіцієнти поділу, здійснюють згідно з алгоритмом, який передбачає:  
 - проектування лінійного ПТ  $n$ -го каскаду згідно із залежністю (8);

$$P_{1,2} \quad K_{1,2} \quad P_{1,1}$$



- еквівалентне заміщення послідовного з'єднання лінійних капілярів ( $d_{i,j}$  і  $l_{i,j}$ ) капіляром  $K_{i,1}^s$  ( $d_{i,1}^s$ ,  $l_{i,1}^s$ ) згідно із залежностями

$$d_{i,1}^s = \left[ \sum_{j=1}^{ms_i} d_{i,j}^{-4} \right]^{-1/4}; \quad l_{i,1}^s = [d_{i,1}^s]^2 \sqrt{\xi X P_0}, \quad (10)$$

де  $i=\overline{1,n}$ ,  $j=\overline{1,2}$  – відповідно індекс каскаду і капілярів у двоелементних ПТ;  $ms_i$  – кількість капілярів  $i$ -го каскаду ПТ, для двокапілярних ПТ  $ms_i=2$ .

- еквівалентне заміщення паралельного з'єднання лінійних капілярів за формулою

$$d_{i-1,1}^p = \left[ d_{i-1,1}^2 + [d_{i,1}^s]^2 \right]^{0,5}; \quad l_{i-1,1}^p = [d_{i,1}^p]^2 \sqrt{\xi X P_0}, \quad (11)$$

де  $d_{i-1,1}^p$ ,  $l_{i-1,1}^p$  – розміри еквівалентного капіляра пакета з двох капілярів  $K_{i-1,1}$  і  $K_{i,1}^s$   $i$ -1-го лінійного ПТ.

Дослідження дії факторів впливу на коефіцієнти поділу доцільно виконувати за допомогою розробленої математичної моделі дросельної схеми

$$\left. \begin{aligned} G_{i-1,2} &= G_{i-1,1} + G_{i,2}; \\ G_{n,2} &= G_{n,1}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

де, крім відомих,  $G_{k,j} = A_{k,j} \left[ \sqrt{1 + Y_{k,j} B_{k,j}} - 1 \right]$ ;  $A_{k,j} = a l_{k,j}$ ;  $Y_{k,j} = \xi X d_{k,j}^4 / l_{k,j}^2$ ;  $B_{k,1} = P_{k,1}^2 - P_0^2$ ;  $B_{m-1,2} = P_{m-2,1}^2 - P_{m-1,1}^2$ ;  $P_{0,1} = P_{1,2}$ ;  $i=\overline{2,n}$ ;  $j=\overline{1,2}$ ;  $k=\overline{1,n}$ ;  $m=\overline{2,n+1}$ .

На основі дросельних схем подільника тисків (рис. 1), каскадного з'єднання ПТ (рис. 2) і поєднання подільників потоків і тисків з суматором потоків (рис. 3) побудовані блоки стабілізованих тисків живлення (БСТ), які забезпечують коефіцієнти поділу  $\chi$  з діапазонів відповідно  $(1; 30]$ ,  $(1; 30^{n_1}]$ ,  $(1; 30^{n_2}]$ , де  $n_1 \leq 3$ ;  $n_2 > 1$ .

Для розширення діапазону концентрацій компонентів сумішей і забезпечення можливості задання різних концентрацій окремих компонентів запропоновано застосовувати блоки дозуючих капілярів (БДК), які представляють собою паралельне з'єднання капілярів з клапанами на їх виходах або без них, тобто пакети змінної або постійної провідностей.

Моделювання та розрахунок дросельних схем з паралельним з'єднанням потребують заміщення пакета капілярів одним еквівалентним капіляром.

У разі застосування в пакеті лінійних капілярів однакової конструкції ( $d_0$ ,  $l_0$ ), розміри прохідного каналу еквівалентного лінійного капіляра визначають як

$$d_e = \sqrt{n} d_0; \quad l_e = n l_0. \quad (13)$$

Для пакета  $n$  лінійних капілярів і з провідностями кратними 2, розміри еквівалентного лінійного капіляра визначають згідно із залежностями

$$d_e = \left[ 2^n - 1 \right]^{0,5} d_0; \quad l_e = \left[ 2^n - 1 \right] l_0, \quad (14)$$

де  $d_0$ ,  $l_0$  – довжина та діаметр першого лінійного капіляра, взятого за базовий.

Якщо пакет складається з капілярів з різною кривизною витратних характеристик, то ідентичність пакета і еквівалентного капіляра досягається лише в одній точці витратної характеристики. У зв'язку з цим при непостійному перепаді тисків витрати газу через пакет і еквівалентний капіляр суттєво відрізняються. Нами розроблений спосіб заміщення пакета з капілярами різної кривизни витратних характеристик, який забезпечує розходження витрати менше  $\pm 0,1\%$  при зміні перепаду тисків на рівні  $\pm 1$  кПа.

Залежності для визначення розмірів ( $d_e$ ,  $l_e$ ) еквівалентного капіляра мають вигляд

$$d_e^4 = \frac{G_{p1} G_{p2} (G_{p2} - G_{p1})}{\xi a^2 X (G_{p1} B_2 - G_{p2} B_1)}; \quad l_e = \frac{G_{p2}^2 B_1 - G_{p1}^2 B_2}{2a (G_{p1} B_2 - G_{p2} B_1)}, \quad (15)$$

де  $G_{p1}$  і  $G_{p2}$  – витрати газу через пакет відповідно для двох  $B_1$  і  $B_2$ , тобто для різних перепадів тиску  $\Delta_{p1}$  і  $\Delta_{p2}$ , залежно від умов роботи пакета.

Заміщення пакета еквівалентним капіляром за допомогою формул (15) гарантує можливість якісного моделювання у широкому діапазоні перепаду тиску.

**У четвертому розділі** розроблені основні методи та засоби для підбирання капілярів систем синтезу газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів.

Розроблення нової концепції, основними принципами якої є залучення до процесу дозування капілярів з *суттєво* різними (до трьох порядків) газодинамічними провідностями (опорами) при забезпеченні задання на них *суттєво* різних перепадів тисків, уможливило одержання газових сумішей з високоточним заданням мікроконцентрацій компонентів. Реалізація концепції стала можливою завдяки розробленню низки засобів для підбирання провідностей на основі мостової (ГДМ), а опорів, об'ємів і тисків за допомогою диференційних схем (ГДДС) із заданням тисків від БСТ.

Пристрій для підбирання провідностей капілярів (пакетів) при однакових перепадах тисків на одному газі (рис. 4) передбачає залучення в одне з плечей моста, наприклад, до точок 3 і 4 підбираного капіляра  $\overline{K_0}$  меншої на 1-2% провідності  $\overline{S_0} = S_0 - \Delta S$ , ніж базового капіляра  $K_0$  і встановлення за показами НІ його збалансованості. У разі розбалансу схеми торець підбираного капіляра  $\overline{K_0}$  поступово підшліфовують до зрівноваження моста. Тиски на вході та виході моста задають від БСТ повторювачами  $\Pi_1$  і  $\Pi_0$ , а також від БСТ за допомогою манометра  $M$  і нуль-індикатора НІ відтворюють тиски в вузлах  $a$  і  $b$  моста.

Встановлено, що мостова схема досягає максимуму чутливості за певного співвідношення розмірів прохідних каналів капілярів подільників моста. Дослідження чутливості схеми виконане із залученням двох типів показчиків рівноваги – нуль-індикатора перепаду тисків (вихідний сигнал  $v$  схеми –  $\Delta_{Pa\delta}$ ) і потоку (вихідний сигнал – потік  $q$  у вихідній діагоналі).

Чутливість  $S_m$  газодинамічного моста визначається чутливістю  $S_{cx} = \{d\Delta_{Pa\delta}/dl; dq/dl\}$  дросельної мостової схеми та чутливістю  $S_n = dv/dp$

( $p=\{\Delta_{Paб}; q\}$ ) застосовуваного в схемі показника рівноваги, яка фактично є заданою. Тому оптимізацію моста можна здійснити лише за чутливістю  $S_{cx}$  схеми.

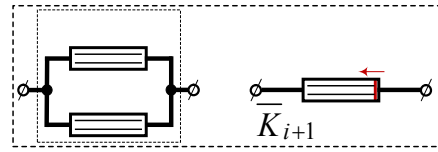
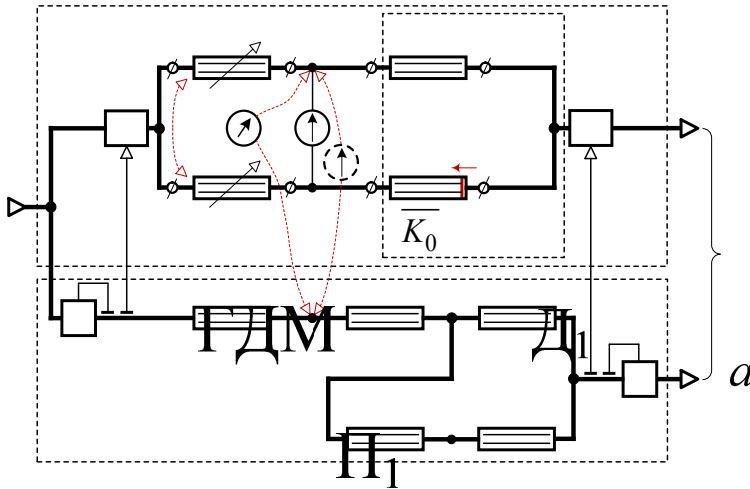


Рис. 4. Принципова схема ГДМ з живленням від БСТ.

$\bar{K}_i$  – підбірані капіляри провідності  $\bar{S}_i$ ; КП $_{i,j}$  – капіляри ПТ; П $_1$ , П $_0$  – повторювачі тиску; НІ – нуль-індикатор; М – манометр; С $_i$  – стабілізатори абсолютного тиску; Д $_i$  – змінні дроселі

Для мостової схеми із нуль-індикатором перепаду тисків залежності чутливості  $S_{cx}$  при підбиранні вхідного і вихідного за напрямом протікання газу капіляра мають вигляд:

$$S_{cx1} = \beta E [\tilde{y}b / (E+1) - L] / (2l_1 P_a); \quad (16)$$

$$S_{cx2} = \beta E [\tilde{y} / (E+1) + L] / (2l_1 P_a), \quad (S_0 - \Delta_s) \quad (17)$$

де  $P_a = \beta \tilde{y} L E$ ;  $\alpha = (P_1^2 + b P_0^2) / \bar{b}$ ;  $b = (d_2 / d_1)^4$ ;  $\bar{b} = b + 1$ ;  $\beta = 2 / (L \bar{b})$ ;  $L = X K_1 \bar{b}$ ;  $K_1 = \xi d_1^4 / l_1^2$ ;  $\tilde{y} = 1 - y_1$ ;  $y_1 = l_2 / l_1$ ;  $L = y_1 + b$ ;  $E = (1 + \gamma / L^2)^{1/2} - 1$ ;  $\gamma = L P_0 b$ ;  $P_{10} = P_1^2 - P_0^2$ .

Для схеми з нуль-індикатором потоку залежності  $S_{cx}$  представлені у вигляді:

$$S_{cx1} = \frac{P_{1,3} \beta \text{КП}_{1,1} \left[ \frac{3d_2^4}{d_5^4} \left[ \frac{P_{41,2} \delta^{41,2} d_1 \text{КП}_{1,2}}{l_2 \lambda \tilde{Z}_1 + l_1 \delta^4 \tilde{Z}_2} \right] + 2 \right]^{-1}}{1 - \tilde{Z}_1}; \quad \text{КП}_{1,1} \quad (18)$$

$$S_{cx2} = \frac{\text{КП}_{2,2} P_{2,1} \text{КП}_{2,1} P_0 C_0}{[1 - \tilde{Z}_2^{-1}] [1 - \tilde{Z}_1^{-1}] S_{cx1}^2}; \quad (19)$$

де  $\tilde{Z}_i = (1 + Z_i)^{1/2}$ ;  $Z_i = Y_i B_i$ ;  $Y_i = K_i X$ ;  $K_i = \xi d_i^4 / l_i^2$ ;  $i = 1, 2$ ;  $\delta = d_1 / d_2$ ;  $\lambda = l_1 / l_2$ ;  $B_1 = P_1^2 - P_a^2$ ;  $B_2 = P_a^2 - P_0^2$ .

Як видно із рис. 5 і рис. 6 залежність чутливості мостової схеми від конструкції подільника мають екстремальний характер для обох типів показників рівноваги.

На основі досліджень чутливості встановлений функційний зв'язок чутливості і похибки  $\delta_R$  у разі підбирання капілярів на мостовій дросельній схемі

$$\delta_R = 2 \Pi / (R_i \cdot S_R), \quad (20)$$

де  $\Pi$  – поріг чутливості НІ;  $S_R$  – чутливість моста;  $R_i$  – абсолютне значення опору підбраного капіляра.

Як приклад згідно із залежністю (20) виконане оцінювання похибки підбирання опору капілярів на азоті з розмірами прохідного каналу ( $d=0,15$  мм,  $l \approx 60$  мм), тисками живлення мостової схеми відповідно  $P_1=160$  кПа і  $P_0=120$  кПа

та НІ з порогом чутливості  $\Pi=1$  Па. Ця похибка складає 0,02 %.

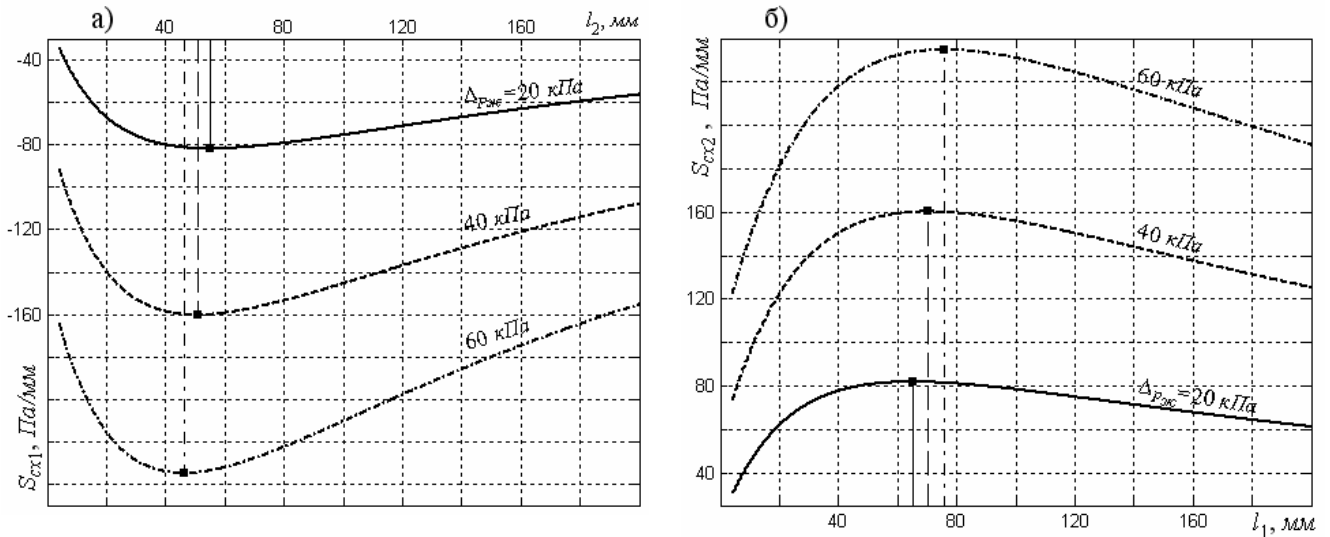


Рис. 5. Залежність чутливості  $S_{cx}$  від довжини постійного капіляра (вихідного а) і вхідного б)) для різних  $\Delta P_{жк}$  моста при виготовленні вхідного а) і вихідного б) капіляра довжиною  $l=60$  мм;  $d_1=d_2=0,15$  мм

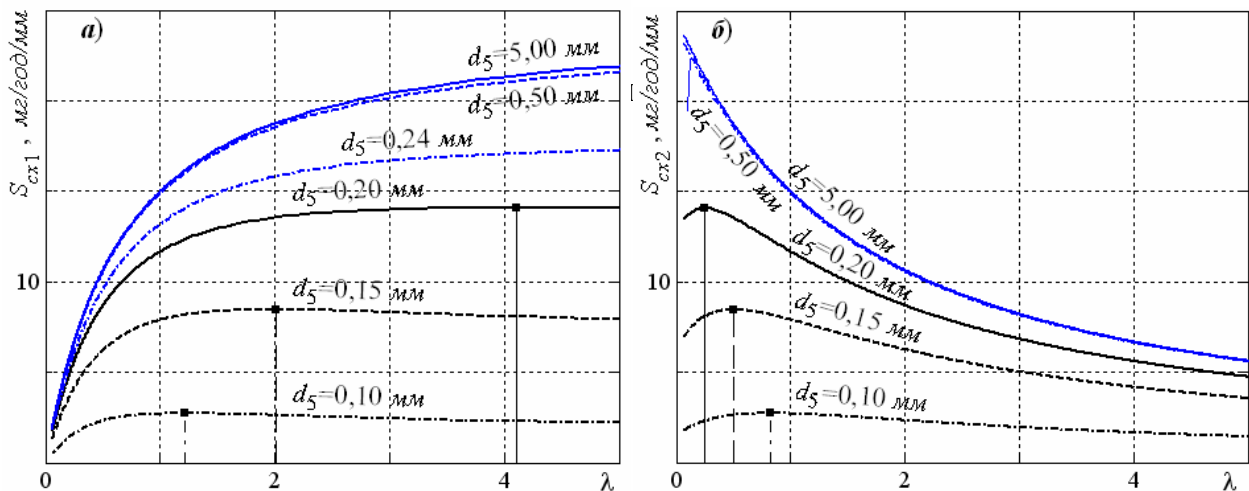


Рис. 6. Залежність чутливості  $S_{cx}$  від співвідношення  $\lambda=l_1/l_2=l_3/l_4$  довжин капілярів моста для різних діаметрів  $d_5$  прохідного каналу протічного елемента при підбиранні: а) вхідних дроселів схеми ( $l_1=l_5=60$  мм); б) вихідних дроселів схеми ( $l_2=l_5=60$  мм)

Одержав розвиток метод підбирання газодинамічних опорів капілярів на різних газах із залученням диференційної схеми в поєднанні з БСТ (рис. 8). Підбирання опорів капілярів на основі розроблених засобів здійснюють як при змінних, наприклад, стабілізують тиски на входах досліджуваних капілярів, так і при постійних перепадах тисків, для чого стабілізують тиски також на виходах капілярів за допомогою повторювачів.

Математична модель для дослідження процесу наповнення камер  $\epsilon_1$  і  $\epsilon_2$  диференційної схеми (рис. 8 а) при підбиранні газодинамічних опорів капілярів  $D_1$  і  $D_2$  у режимі змінного перепаду тисків (повторювачі  $\Pi_2$  і  $\Pi_3$  на виходах  $D_1$  і  $D_2$  не встановлені) має вигляд

$$\left. \begin{aligned} dP_{k_1} / d\tau &= A_{m_1} \left( \sqrt{1 + Y_1 (P_1^2 - P_{k_1}^2)} - 1 \right); \\ dP_{k_2} / d\tau &= A_{m_2} \left( \sqrt{1 + Y_2 (P_1^2 - P_{k_2}^2)} - 1 \right), \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

де  $P_{k_1}, P_{k_2}$  – абсолютні значення тисків газів відповідно в камерах  $\epsilon_1$  і  $\epsilon_2$ ;  
 $A_{m_i} = A_i / m_{p_i}$ ,  $m_{p_i} = M V_i / (R T)$  – коефіцієнти у рівняннях системи,  $i=1, 2$ .

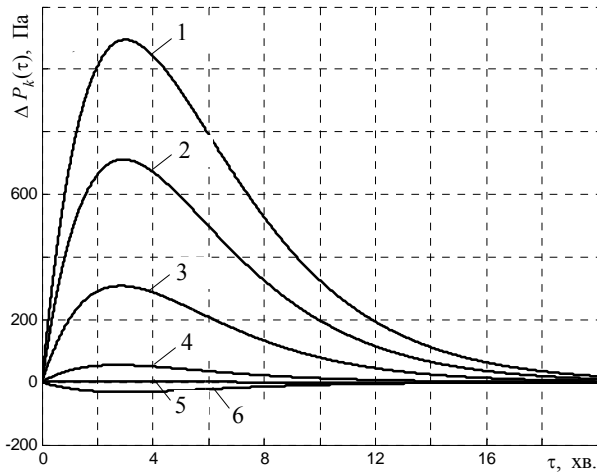


Рис. 7. Графіки залежності  $\Delta P_k(\tau)$  у камерах  $\epsilon_1$  і  $\epsilon_2$  диференційної схеми при підбиранні рівноопорових капілярів  $D_1$  і  $D_2$  на різних газах ( $N_2$  і  $O_2$ )

Як видно з рис. 7 за допомогою моделювання можна значно зменшити тривалість процесу підбирання капілярів завдяки зменшенню кількості проміжних скорочень довжини каналу капіляра. Перехідні процеси 2-6 зміни  $\Delta P_k(\tau)$  відповідають скороченню довжини  $\Delta l_{O_2}$  капіляра на лінії  $O_2$  (початково однакових довжин  $l_{N_2} = l_{O_2}$  і діаметрів каналів підбраних капілярів (крива 1)) відповідно на 5,0; 10,0; 13,0; 13,6; 14,0 мм.

Для реалізації розробленої концепції побудови газодинамічних систем синтезу сумішей з мікроконцентраціями компонентів (на рівні 1 ppm) нижче представлена послідовність операцій із залученням газодинамічних засобів, необхідних для підбирання провідностей (опорів) капілярів  $D_1$  і  $D_2$  на одному і різних газах, об'ємів камер  $\epsilon_1$  і  $\epsilon_2$ , а також заданих співвідношень  $\Delta p$  на основі БСТ.

Ця послідовність передбачає підбирання за допомогою:

- 1) дросельного моста (рис. 4) капілярів, значення провідності яких  $2^{i-1}$  ( $i=1, \dots, 6$ ) кратні провідності  $S_0$  базового капіляра  $K_0$  ( $S_1=2 S_0, S_2=4 S_0, \dots, S_5=32 S_0$ );
- 2) диференційної схеми (рис. 8 а) заданого відношення об'ємів камер  $\epsilon_1$  і  $\epsilon_2$ :
  - а) 1:1 ( $V_0:V_0$ ) з використанням двох рівнопровідних  $S_0$  капілярів  $K_1$  і  $K_2$  та камери  $\epsilon_1$  з об'ємом  $V_0$ ;
  - б) 1:32 ( $V_0:32 V_0$ ) з використанням капілярів  $K_1$  і  $K_2$  з провідностями  $S_0$  і  $32 S_0$  та камери  $\epsilon_1$  з об'ємом  $V_0$ ;
- 3) диференційної схеми опору капіляра  $K_2$ :
  - а)  $R_5=32 R_0$  ( $S_5=32^{-1} S_0$ ) з використанням капіляра  $K_1$  з опором  $R_0$  ( $S_0$ ) та камер  $\epsilon_1$  і  $\epsilon_2$  з об'ємами  $32 V_0$  і  $V_0$  (рис. 8 а);

б)  $R_5^{\text{газ2}}=32R_0^{\text{газ2}}$  на газі<sub>2</sub> за допомогою капіляра  $K_1$  з опором  $32R_0$  та камер  $\epsilon_1$  і  $\epsilon_2$  з об'ємами  $V_0$  (рис. 8 в).

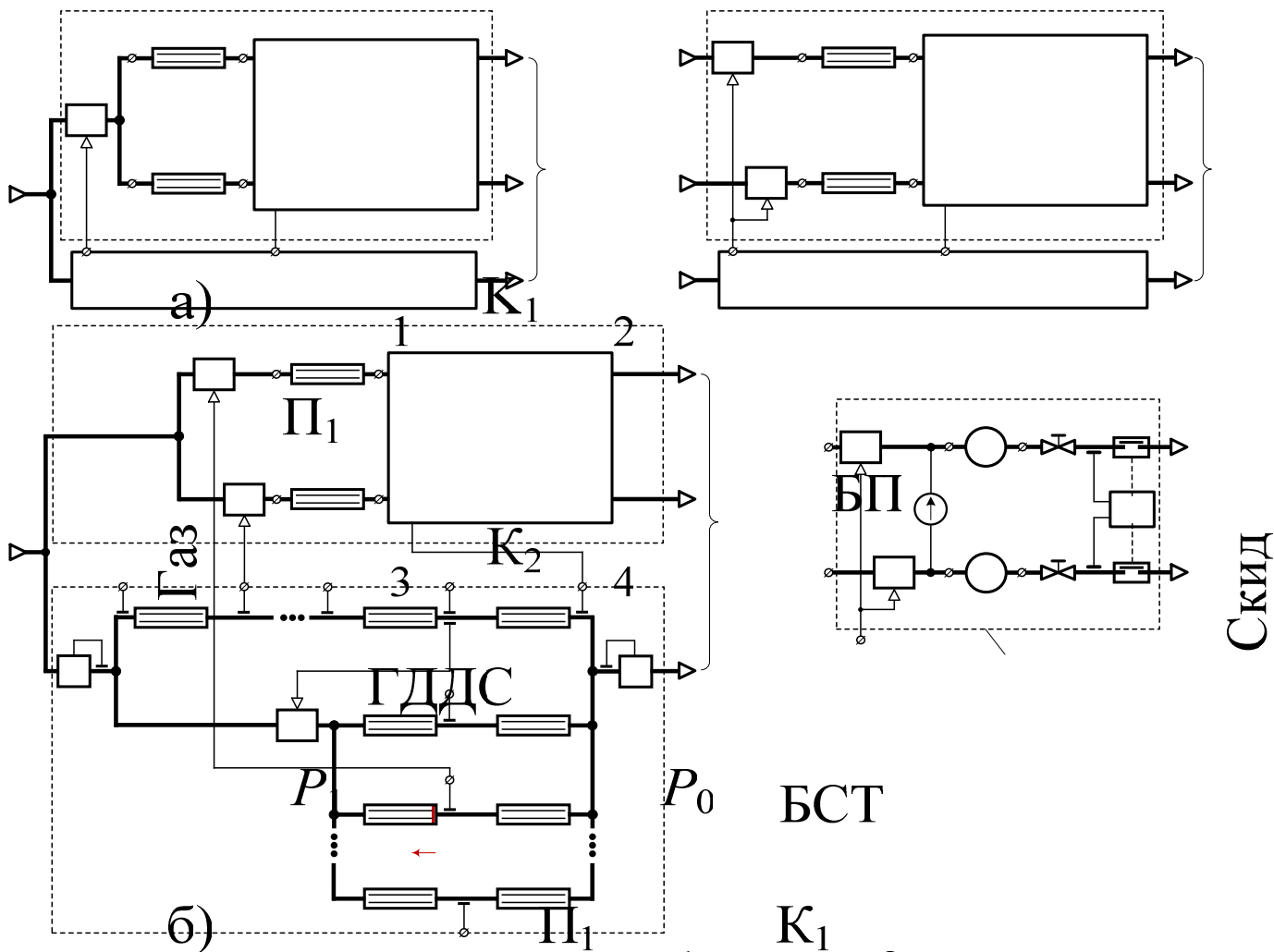


Рис. 8. Диференційна схема із живленням від БСТ для підбирання заданого співвідношення:

а) об'ємів камер; б)  $\Delta p$  на дозуючих капілярах; в) опорів капілярів на різних газах. БП – блок порівняння; Ш<sub>i,j</sub> – штуцери; П<sub>1</sub>-П<sub>4</sub> і ПП<sub>1</sub> – повторювачі відповідно для семи і подільників тисків БСТ; С<sub>1</sub>, С<sub>0</sub> – стабілізатори абсолютного тиску

У підсумку виконаних операцій на етапах 1-3 одержані (рис. 4 і 8 а):

- капіляри з провідностями  $\{1, 2^1, \dots, 2^5\} \cdot S_0$  і капіляр з опором  $32R_0$  ( $32^{-1}S_0$ ), тобто капіляри з співвідношенням провідностей 1:1024;
- капіляр з опором  $32R_0^{\text{газ}}$  на одному із газових компонентів суміші;
- камери з рівними (1:1) і кратними (1:32) об'ємами

На диференційній схемі із залученням:

4) капілярів  $K_1$  і  $K_2$  відповідно з опором  $32R_0$  і провідністю  $32S_0$ , а також двох камер  $\epsilon_1$  і  $\epsilon_2$  з об'ємами  $V_0$  скороченням каналу капіляра, наприклад  $K_{3,2}$ , БСТ підбирають співвідношення тисків 1:1024 (рис. 8 б);

5) капіляра  $K_1$  із заданим опором (провідністю) на газі<sub>1</sub>, відповідних об'ємів двох камер  $\epsilon_1$  і  $\epsilon_2$  при заданому на БСТ співвідношенні перепадів тисків, підбирають опір капіляра на газі<sub>2</sub> (рис. 8 в).

Таким чином на основі розробленої концепції завдяки поєднанню БСТ з мостовою і диференційною схемами без вимірювання абсолютних значень тисків (перепадів тиску), витрат і об'ємів реалізоване підбирання капілярів із *суттєво* різними співвідношеннями провідностей (опорів), а також співвідношення перепадів тисків такого ж порядку, що забезпечує приготування сумішей з мікроконцентраціями компонентів.

**П'ятий розділ присвячений** розробленню та застосуванню принципів побудови систем синтезу сумішей з мікроконцентраціями компонентів, зокрема, синтезаторів для перевірки газоаналітичної апаратури.

Концепція побудови таких синтезаторів передбачає залучення до дозування кожного компонента газової суміші високоточного капілярного задавача витрати.

Як базовий, на рис. 9 представлений задавач, який містить БДК газового компонента та БСТ на основі каскадного з'єднання лінійних подільників тиску. БДК складається з  $n$  паралельно з'єднаних дозуючих капілярів  $K_1 - K_n$ , провідність кожного з яких має строго задане значення. Абсолютні тиски на входах і виходах капілярів відтворюються повторювачами  $\Pi_1$  і  $\Pi_0$ . На виходах капілярів встановлені електромагнітні клапани  $K_{Л1} - K_{Лn}$ , комбінацію включення яких для дискретного задання витрати забезпечує мікроконтролерний блок керування МБК.

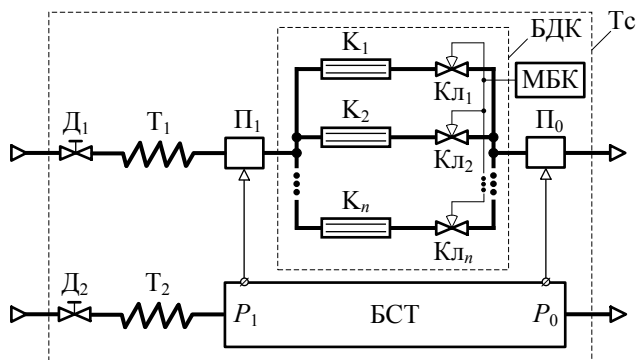


Рис. 9. Принципова схема газодинамічного задавача витрати газу

На входах блоків БДК і БСТ встановлені відповідно змінні дроселі  $D_1, D_2$ , призначені для згладжування можливих стрибків тиску входних потоків газу і послідовно з'єднані з ними теплообмінники  $T_1, T_2$  для вирівнювання температур газу і повітря з температурою термостата  $T_c$ .

Одержана залежність для визначення кількості  $n$  капілярів задавача з витратами  $Q_i = 2^{i-1} Q_\Delta$  ( $i = \overline{1, n}$ ) із діапазону  $[Q_\Delta; Q_k]$  з дискретністю  $Q_\Delta$

$$n = \log_2 (Q_k / Q_\Delta + 1). \quad (22)$$

Витрату  $Q_3$  задають вибіркою капілярів за індексами із множини  $\{1, \dots, n\}$

$$Q_3 = \sum_{i \in \{1, \dots, n\}} Q_i. \quad (23)$$

*Приклад.* Спроекувати задавач витрати для діапазону  $[0; 7]$  л/год з дискретністю  $Q_\Delta = 0,2$  л/год.

Згідно із залежністю (22)  $n = 6$ , а тому треба шість капілярів для забезпечення витрат –  $\{0,2; 0,4; 0,8; 1,6; 3,2; 6,4\}$  л/год. Такий набір дає  $Q_k/Q_\Delta = 35$  значень

витрати в заданому діапазоні, проте реально він визначає більш широкий діапазон задання витрати, а саме до 12,6 л/год в 63 точках.

Розроблені методи та принципи побудови газодинамічних систем, які забезпечують неперервне приготування сумішей з мікроконцентраціями компонентів без використання багатостадійного розчинення і атестацію сумішей за підібраними значеннями провідностей і строго заданим співвідношенням перепадів тисків. За розробленою концепцією потрібно забезпечити:

1. *різні перепади тисків на капілярах змішувача для різних компонентів.*

Капіляри, встановлені в каналі компонента з найменшою концентрацією  $r_{min}$  в суміші повинні дозувати найменшу витрату, а капіляри в каналі компонента з найбільшою концентрацією  $r_{max}$  в суміші – найбільшу. Для компонента з  $r_{min}$  цього досягають встановленням мінімально можливого перепаду тиску  $\Delta P_{min}$  і вибором найменшого з доступних діаметрів  $d_{min}$  прохідного каналу капіляра і довжиною  $l$  прийнятних розмірів. Довжина каналу капіляра може бути обмежена або критерієм Рейнольдса ( $Re < 2320$ ) або характером (кривизною) витратної характеристики. Для компонента з  $r_{max}$  встановлюють максимально можливий перепад тиску  $\Delta P_{max}$ , а розміри каналу капіляра вибирають із діапазону прийнятних конструкцій. Для компонентів з концентраціями  $r \in (r_{min}; r_{max})$  задають проміжні значення перепадів  $\Delta P \in (\Delta P_{min}; \Delta P_{max})$  згідно з концентраціями компонентів в суміші.

Концентрацію  $i$ -го компонента в  $n$ -компонентній суміші, яку отримують за допомогою газодинамічного синтезатора (ГДС), в каналах якого встановлені пакети з постійною провідністю, визначають так

$$r_i = k_{\Delta P_i} \left[ \sum_{j=1}^{m_i} S_{i,j} \right] \cdot \left[ \sum_{k=1}^N \left\{ k_{\Delta P_k} \sum_{l=1}^{m_k} S_{k,l} \right\} \right]^{-1}, \quad (24)$$

де  $m_i$  – кількість капілярів з провідностями  $S_{i,j}$  ( $j, l = \overline{1, m_i}$ ), які встановлені в  $i$ -му каналі ( $i, k = \overline{1, N}$ ) змішувача ГДС;  $k_{\Delta P_i}$  – коефіцієнт, визначений як відношення перепаду тисків на капілярах пакета в  $i$ -му каналі до перепаду тисків на капілярах компонента з максимальною концентрацією в суміші, причому  $k_{\Delta P_i} \in (0; 1]$ .

У разі застосування пакетів із змінною провідністю (на виходах капілярів пакетів встановлені клапани) відповідну концентрацію компонента визначають як

$$r_i = k_{\Delta P_i} \left[ \sum_{j=\{1, \dots, m_i\}} S_{i,j} \right] \cdot \left[ \sum_{k=1}^N \left\{ k_{\Delta P_k} \sum_{j=\{1, \dots, m_k\}} S_{k,j} \right\} \right]^{-1}, \quad (25)$$

де  $\{1, \dots, m_i\}$  – вибірка елементів множини, тобто індексів залучених капілярів  $i$ -го пакета;  $S_{i,j}$  – провідність  $j$ -го залученого капіляра  $i$ -го пакета.

2. *Побудову синтезатора на основі функціонального поєднання змішувача та блоку стабілізованих тисків живлення.* Таке поєднання змішувача, в канали якого вбудовані задавачі витрати і БСТ забезпечує одностадійність приготування сумішей з мікроконцентраціями компонентів, суттєве зменшення кількості



дозуючих капілярів, а також вищі точність та відтворюваність вмісту компонентів, крім того, живлення від БСТ забезпечує однонапрямленість можливих змін тисків від стабілізаторів на кінцях дозуючих капілярів. Перевагою також є те, що в кожному каналі компонента не треба використовувати стабілізатор абсолютного тиску.

3. *Задання перепадів тисків на капілярах змішувача з подільника тисків.* Перепади тисків на дозуючих капілярах змішувача ГДС задають повторювачами тисків від багатоеlementного подільника, кількість капілярів якого визначається кількістю суттєво різних концентрацій компонентів у синтезованій суміші.

Розміри прохідних каналів усіх капілярів лінійного ПТ для забезпечення заданих міждросельних тисків (коефіцієнтів поділу) визначають за системою (8).

4. *Застосування в блоці стабілізованих тисків живлення каскадного з'єднання кількох подільників тиску.* Каскадне з'єднання подільників забезпечує поділ тисків наступним подільником перепаду на останньому капілярі попереднього подільника. Так, наприклад, на одному лінійному каскаді подільника, який працює на повітрі, через різні обмеження можна досягнути співвідношення  $\Delta_{P_{max}}/\Delta_{P_{min}} \approx 30$ , а при застосуванні вже двох каскадів воно може бути на рівні  $10^3$ .

5. *Використання в змішувачі та подільниках блоку живлення синтезаторів лінійних капілярів.* Лінійні капіляри – капілярні трубки з такими розмірами ( $d$  і  $l$ ) прохідного каналу, які забезпечують лінійну залежність витрати дозованого газу від перепаду тисків при фіксованому тиску на виході капіляра. Застосування таких капілярів дає можливість пропорційно змінювати всі міждросельні тиски подільника, а отже і витрати компонентів через дозуючі капіляри змішувача. Таким чином компенсують зміну тиску живлення подільника, а крім того можна змінювати в певних межах і витрату приготовлюваної суміші при незмінних концентраціях її компонентів зміною тиску на вході першого ПТ блоку живлення.

6. *Застосування повітря як робочого газу в блоці стабілізованих тисків живлення.* Застосування блоку живлення (ПТ якого працюють на повітрі) сприяє економному використанню чистих компонентів, оскільки приготування сумішей з мікроконцентраціями компонентів стало можливим на одній стадії розчинення без скидання значної частини проміжних сумішей (чистих компонентів).

7. *Відтворення міждросельних тисків подільника у змішувачі за допомогою повторювачів тиску.* Для високоточного відтворення тисків запропонована система, елементами якої є повторювач, нуль-індикатор перепаду тисків, виконавчий механізм і коректуючий дросель, яка забезпечує похибку відтворення на рівні кількох Па.

8. *Компенсація основних факторів впливу (тисків і температур) завдяки розробленим новим залежностям, які враховують нерівність перепадів тисків на капілярах змішувача і нелінійність залежності коефіцієнта в'язкості від температури.*

9. *Заміна капіляра неприйнятних розмірів ( $d > 0,5$  чи  $l > 150$  мм) пакетом  $n$*

капілярів з ідентичною витратною характеристикою

$$l_p = l_k/n; \quad d_p = d_k/n^{1/2}, \quad (26)$$

де  $l_p, d_p$  – параметри, які стосуються капілярів пакета;  $l_k, d_k$  – стосуються капіляра неприйнятних розмірів;  $n$  – довільне натуральне число, яке забезпечує прийнятні розміри капіляра пакета.

На основі розроблених принципів побудована узагальнена схема ГДС для приготування сумішей з мікроконцентраціями компонентів (рис. 10).

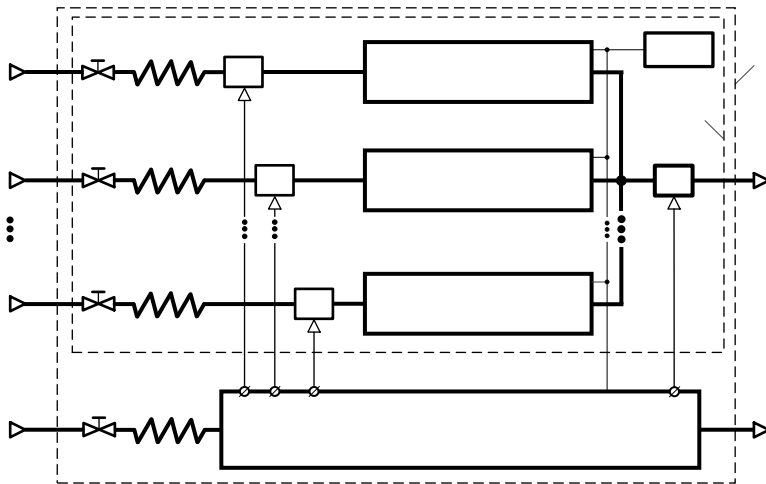


Рис. 10. Узагальнена принципова схема ГДС складних сумішей з мікроконцентраціями компонентів. Зм – змішувач чистих компонентів КС<sub>1</sub> – КС<sub>N</sub>; П<sub>0</sub> – П<sub>N</sub> – повторювачі тисків; Тс – термостат

ГДС  $n$ -компонентної суміші з мікроконцентраціями компонентів повинен містити два основні блоки: змішувач Зм та стабілізованих тисків живлення БСТ, міждросельні тиски лінійних подільників яког БДК<sub>1</sub> відтворюють повторювачами П<sub>*i*</sub> ( $i = \overline{1, N}$ ) на входах блоків дозуючих капілярів БДК<sub>*i*</sub> і на їх виході повторювачем П<sub>0</sub>. Основною перевагою розробленої 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 на вході БСТ. Ввімкнення клапанів Кл<sub>*i,j*</sub> (де  $j = \overline{1, n_i}$  – номер капіляра в  $i$ -му пакеті з  $n_i$  капілярами), встановлених на виході кожного з капілярів блока БДК<sub>*i*</sub> для приготування необхідної концентрації компонентів суміші здійснює МБК, який також керує роботою системи термостатування, поданням потоків компонентів у канали ГДС, вузлами відтворення тисків (повторювачами) БДК<sub>*n*</sub>.

Як приклад реалізації вказаних принципів розроблений газодинамічний синтезатор (рис. 11), призначений для приготування перевірювальних трикомпонентних газових сумішей Ar-O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>, в яких вміст O<sub>2</sub> і N<sub>2</sub> є на рівні мікроконцентрацій складає відповідно 0,002...0,004 % і 0,003...0,005 %. Такі суміші призначені для калібрування газаналізатора чистоти аргону БСТ.

Синтезатор містить змішувач Зм, у входні канали якого подають відповідно чисті Ar, N<sub>2</sub> і O<sub>2</sub>. В каналах цих компонентів встановлені пакети ПЗ<sub>1,1</sub>, ПЗ<sub>2</sub>, ПЗ<sub>3</sub> капілярів, які дозують відповідні гази при перепаді тиску  $\Delta p = 100$  Па. Капіляри КЗ<sub>7</sub>-КЗ<sub>9</sub> в каналі N<sub>2</sub> забезпечують концентрації  $r_{N_2} \in \{0,003; 0,004; 0,005\}$  %,

КЗ<sub>4</sub>-КЗ<sub>6</sub> – концентрації  $r_{O_2} \in \{0,002; 0,003; 0,004\}$  %, а КЗ<sub>1</sub>-КЗ<sub>3</sub> – капіляри для компенсації аргонем зміни концентрації (витрати) домішок з дискретністю 0,001 %. Крім того, в каналі Ar окремо встановлений пакет ПЗ<sub>1</sub> з  $n=5$  постійних капілярів кратної провідності, на якому підтримують перепад тиску  $\Delta p = 19,8$  кПа для дозування основного потоку аргону. На виході кожного з капілярів КЗ <sub>$i$</sub>  встановлений відповідний електромагнітний клапан Кл <sub>$i$</sub>  ( $i = \overline{1, 9}$ ), ввімкнення яких здійснює МБК. Всі елементи змішувача Зм і БСТ розміщені в термостаті Тс з температурою  $T = 300 \pm 0,1$  К.

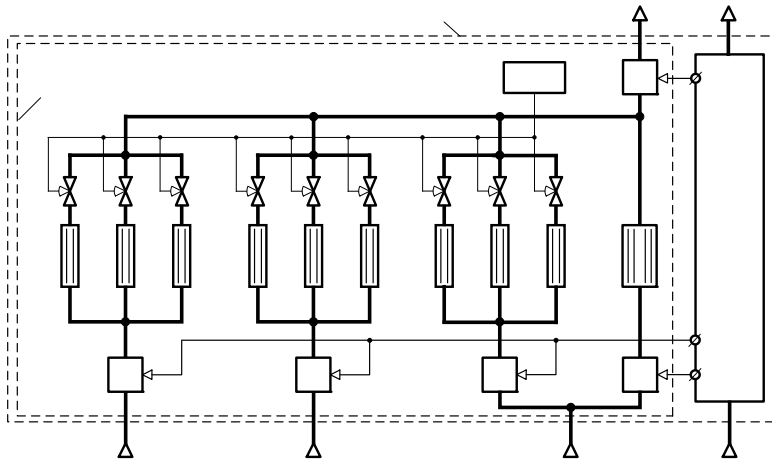


Рис. 11. Принципова схема синтезатора для одержання трикомпонентних перевірювальних газових сумішей Ar-O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>.  
 Зм – змішувач газових газів;  
 К – капіляри змішувача; ПК – пакет капілярів; ПЗ – повторювачі тиску змішувача; Кл – клапани;  
 Тс – термостат

БСТ побудований на основі трикаскадної схеми поєднання подільників потоків і тисків з суматором потоків. Повторювачі ПЗ<sub>0</sub> і ПЗ<sub>1,1</sub>, ПЗ<sub>2</sub>, ПЗ<sub>3</sub> відтворюють міждросельні тиски відповідно  $P_{1,1} = 139,8$  кПа і  $P_{3,1} = 120,1$  кПа на входах капілярів змішувача Зм, а повторювач ПЗ<sub>0</sub> – тиск  $P_0 = 120$  кПа на виході капілярів.

Крім того, на основі розроблених принципів побудовані газодинамічні синтезатори для перевірки сигналізаторів чадного газу в промислових і житлових приміщеннях, калібрування хроматографів димових газів на наявність вмісту диоксиду азоту, а також ГДС «метан-повітря» для самоконтролю справності сигналізації системи загазованості компресорного відділення газонаповнювальної станції.

Оцінка граничних похибок  $\delta_{r_i}^{2p}$  задання концентрацій виконана з використанням основних положень теорії похибок на прикладі синтезатора компонентів суміші «Ar-O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>» (для суміші 40 ppm O<sub>2</sub> і 50 ppm N<sub>2</sub> в аргоні) на основі залежності

$$\delta_{r_i}^{2p} = \sum_{p \in \{l, \mu, d, T, \xi, P_0, \Delta p\}} (|K_p^{(i)}| \delta_p), \quad (27)$$

де  $K_p^{(i)}$  – вагові коефіцієнти впливу  $p$ -го параметра на  $i$ -ту концентрацію,

визначені із залежності  $K_p^{(i)} = \frac{\partial r_i}{\partial p} \frac{p}{r_i}$ , де  $p$  – відповідний параметр впливу із

вибірки  $\{l, \mu, d, T, \xi, P_0, \Delta p\}$ .

Вирази для визначення відповідних коефіцієнтів  $K_p^{(i)}$ :

$$\left. \begin{aligned}
 K_{p \in \{l, \mu, d, \Delta p\}}^{(i)} &= \left| K_{p_i}^{(i)} \right| + \sum_{k=1; k \neq i}^N \left| K_{p_k}^{(i)} \right|; \\
 K_{l_i}^{(i)} &= K_{\mu_i}^{(i)} = (1 - r_i) \left( 1 - g_i^{-1} \sum_{j=1}^{n_i} \bar{z}_{i,j} \right); \quad K_{l_k}^{(i)} = K_{\mu_k}^{(i)} = r_i g_i^{-1} \left( \sum_{j=1}^{n_k} \bar{z}_{k,j} - g_k \right), \quad k \neq i; \\
 K_{d_i}^{(i)} &= 2(1 - r_i) g_i^{-1} \sum_{j=1}^{n_i} \bar{z}_{i,j}; \quad K_{d_k}^{(i)} = -2r_i g_i^{-1} \sum_{j=1}^{n_k} \bar{z}_{k,j}, \quad k \neq i; \\
 K_T^{(i)} &= -K_\xi^{(i)} = 2^{-1} g_i^{-1} \left\{ r_i \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{n_k} \bar{z}_{k,j} - \sum_{j=1}^{n_i} \bar{z}_{i,j} \right\}; \\
 K_{P_0}^{(i)} &= g_i^{-1} P_0^2 \left\{ r_i \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{n_k} \bar{y}_{k,j} - \sum_{j=1}^{n_i} \bar{y}_{i,j} \right\}; \\
 K_{\Delta P_i}^{(i)} &= (r_i - 1) g_i^{-1} \sum_{j=1}^{n_i} (\bar{y}_{i,j} B_{\Delta_i}); \quad K_{\Delta P_k}^{(i)} = -r_i g_i^{-1} \sum_{j=1}^{n_k} (\bar{y}_{k,j} B_{\Delta_k}), \quad k \neq i,
 \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

де  $g_{i,j} = a_{i,j} (z_{i,j}^{1/2} - 1)$ ;  $a_{i,j} = \mu_i l_{i,j}$ ;  $z_{i,j} = 1 + Z_{i,j}$ ;  $\bar{z}_{i,j} = a_{i,j} z_{i,j}^{-1/2} Z_{i,j}$ ;  $\bar{y}_{i,j} = a_{k,j} z_{k,j}^{-1/2} Y_{k,j}$ ;  
 $B_{\Delta_i} = \Delta_{P_i}^2 + \Delta_{P_i} P_0$ .

Одержані так значення граничних похибок  $\delta_{r_{O_2}}^{2p}$  і  $\delta_{r_{N_2}}^{2p}$  задання концентрацій кисню і азоту за ваговими коефіцієнтами складових є на рівні 12 %, а гранична похибка  $\delta_{r_{Ar}}^{2p}$  концентрації аргону в суміші не перевищує тисячної частки.

Оцінка граничної похибки задання концентрацій компонентів вказаної потрійної газової суміші за результатами вимірювання витрат в каналах синтезатора дала такі результати. Так, якщо похибка вимірювання витрат мікропотоків газів плівковим витратоміром є на рівні 2 %, а макропотоків – 0,2 %, то визначена за ваговими коефіцієнтами гранична похибка задання мікроконцентрацій кисню та азоту в суміші складає відповідно 2,16 і 2,14 %, а гранична похибка задання концентрації аргону є на кілька порядків меншою.

Також визначені граничні похибки задання концентрацій компонентів суміші «Ar-O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>», одержуваної за допомогою синтезатора (рис. 11), побудованого на основі капілярів з суттєво різними кратними провідностями (1:101) і перепадами тисків (1:198) на них. Тобто, якщо атестувати синтезатор за співвідношеннями провідностей і перепадів тисків, то похибка задання кисню і аргону, які є в суміші на рівні мікроконцентрацій не перевищує 0,3 %, тоді як похибка задання основного компоненту – аргону, який є в суміші на рівні макроконцентрації, менша на кілька порядків.

Виконаними дослідженнями також встановлено, що для газодинамічного синтезатора складних багатокомпонентних сумішей з мікроконцентраціями

окремих компонентів, побудованого на основі лінійного дросельного задавача тисків і лінійних дозуючих капілярів з кратними провідностями похибка підтримання концентрацій внаслідок впливу завод (ймовірні зміни вхідного і вихідного тисків на кінцях дозуючих капілярів, відхилення температури від заданої в термостаті) не перевищує 0,1 %.

Отже, застосування розроблених принципів забезпечує:

- неперервне приготування багатокомпонентних сумішей з мікроконцентраціями окремих компонентів на місці використання, а не в умовах спеціалізованих лабораторій з наявністю високопрофесійних спеціалістів і унікального обладнання;

- не менше, ніж на порядок, підвищення точності задання концентрації компонентів і низькі похибки підтримання концентрацій компонентів.

## **ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ**

Дисертація присвячена новому розв'язанню науково-прикладної проблеми – синтезу високоточних систем неперервного приготування складних газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів, що стало можливим, зокрема, завдяки застосуванню принципу дозування різних компонентів з *суттєво різними* співвідношеннями опорів і перепадами тисків на дозуючих елементах, а також розробленню нових методів компенсації факторів впливу. Це забезпечило створення методів побудови газодинамічних систем синтезу багатокомпонентних газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів. Основними перевагами цих методів є висока точність задання і стабільність концентрацій компонентів синтезованих сумішей, а також можливість керування цими концентраціями. При цьому одержані такі основні наукові та практичні результати:

1. На основі аналізу сучасного стану синтезу газових сумішей з малими і мікроконцентраціями компонентів обґрунтована об'єктивна необхідність і можливість розвитку газодинамічного методу синтезу сумішей. Ця можливість базується на ідеї застосування дозуючих капілярів (зокрема лінійних, з рівними чи кратними газодинамічними опорами) при суттєво різних перепадах тиску залежно від значення концентрації відповідного компонента суміші.

2. На основі експериментального дослідження параметрів потоку газу в прохідному каналі капіляра розроблені методи уточнення значення ефективного діаметра прохідного каналу капіляра для робочих умов газодинамічних пристроїв і значення коефіцієнта кінцевих ефектів витратної характеристики.

3. Розроблені та досліджені типові базові схеми систем синтезу газових сумішей, зокрема послідовне, паралельне і комбіноване з'єднання капілярів, а також схеми подільників та суматорів потоків. Одержані умови лінійності типових базових схем. Вперше розроблені лінійні багатокапілярні подільники тисків, які забезпечують одночасну і пропорційну зміну всіх міждросельних тисків при можливих змінах тиску живлення подільника та одержані їх математичні моделі. На основі цих подільників запропоновані каскадні подільники для задання тисків на кінцях дозуючих капілярів газодинамічних

синтезаторів, а також поєднання подільників потоків і тисків з суматорами, що дало можливість відтворення перепадів тисків, які різняться між собою на два-три порядки. Введене поняття еквівалентного дроселя для базових типів з'єднання дроселів, що забезпечило моделювання і розрахунок газодинамічних систем синтезу сумішей.

4. Розроблені диференційні методи і засоби високоточного експериментального підбору елементів газодинамічних систем синтезу газових сумішей:

- для встановлення рівності газодинамічних опорів дроселів на одному та різних газах при суттєво різних перепадах тисків, які забезпечують підбирання рівних і кратних за опором (провідністю) дозуючих капілярів;

- підбору камер з різним співвідношенням об'ємів без вимірювань абсолютних розмірів;

- високоточного задання поділу тисків за допомогою багатоеlementного послідовного і каскадного з'єднання капілярів, а також поєднання подільників потоків і тисків з суматорами потоків.

5. Досліджена і проаналізована чутливість дросельних мостових схем з метою оцінки похибки підбору рівноопорних газодинамічних опорів капілярів. Одержані математичні моделі, використання яких забезпечує максимум чутливості схеми з показником рівноваги протічного типу, а також перепаду тисків у вихідній діагоналі. Оцінена похибка підбору капілярів на основі мостової схеми, яка складає 0,02 %, що свідчить про можливість приготування високоякісних газових сумішей на основі рівних (кратних) газодинамічних опорів (провідностей).

6. Розроблені методи побудови газодинамічних систем синтезу високоточних багатокомпонентних сумішей з мікроконцентраціями компонентів:

- на основі дозування компонентів дроселями, на яких встановлені суттєво різні перепади тиску залежно від концентрації відповідного компонента суміші;

- з розділенням кіл дозування компонентів дроселями і задання тисків на них, де в колах дозування тиски на дросельних елементах відтворюються від окремого кола задання стабілізованих тисків;

- на основі поєднання дозування компонентів лінійними капілярами для задання тисків від блоків стабілізованих тисків, побудованих на основі каскадного з'єднання лінійних подільників або утвореного поєднанням подільників потоків і тисків з суматором потоків;

- на основі застосування капілярів з рівними і кратними газодинамічними опорами (провідностями) на різних перепадах тисків.

7. Розроблений газодинамічний задавач витрати газу-носія із заданням тисків живлення від капілярного лінійного подільника, а розроблена математична модель задавача витрати забезпечує його проектування з мінімальною кількістю капілярів з кратними опорами. Відносна похибка задання витрати не перевищує 0,3 %, а відтворюваність – 0,05 %.

Розроблені синтезатори для калібрування газоаналізатора контролю чистоти аргону, перевірки системи попереджувальної та аварійної сигналізації витоків метану в приміщеннях автогазонаповнювальних компресорних станцій, а також для діагностування сигналізатора чадного газу в побутових приміщеннях.

Створений також газодинамічний синтезатор для перевірки хроматографа димових газів, який впроваджений на Добротвірській ТЕС. Впровадження синтезатора для калібрування хроматографів димових газів забезпечило підвищення точності визначення концентрації компонентів у кілька раз, а також зростання ефективності роботи котлоагрегату.

### ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ділай І. Основи побудови дросельних синтезаторів газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів / І.Ділай // Вісник Тернопільського НТУ. – 2013. – №2. – С.164-172.
2. Ділай І.В. Дослідження коефіцієнта кінцевих ефектів витратної характеристики капіляра / І.В.Ділай // Науковий Вісник НЛТУ України. – Львів. – 2013. – Вип.23.8 – С.131-137.
3. Ділай І.В. Побудова синтезаторів для забезпечення аналізу димових газів / І.В.Ділай, З.М.Теплюх // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – № 3/9. – С.45-50.  
(входить в міжнародну наукометричну базу Copernicus)
4. Ділай І.В. Автоматизоване управління концентраціями компонентів газової суміші / І.В.Ділай, З.М.Теплюх // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. – Луцьк. – 2007. – Вип. 20. – С.142-146.
5. Ділай І.В. Дросельні синтезатори газових сумішей заданого складу / І.В.Ділай, З.М.Теплюх // Вісник Тернопільського ДТУ. – 2008. – № 3. – С.165-171.
6. Ділай І.В. Синтез газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів / І.В.Ділай, З.М.Теплюх, О.І.Ціцюра // Вісник Хмельницького національного університету. – 2013. – №4. – С.44-48.
7. Ділай І.В. Газодинамічний зрівноважений міст для одержання дроселів з рівними опорами / І.В.Ділай, З.М.Теплюх // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація". – 2008. – № 617. – С.183-189.
8. Ділай І.В. Пристрій з нуль-індикатором потоку для виготовлення дроселів з рівними опорами / І.В.Ділай, З.М.Теплюх // Вісник НТУ "ХП" / Збірник наукових праць. Темат. випуск: Автоматика та приладобудування. – 2008. – №57. – С.63-72.
9. Ділай І.В. Дросельний міст з нуль-індикатором перепаду тисків / І.В.Ділай, З.М.Теплюх // Вимірювальна техніка та метрологія / Міжвідомчий науково-техн. зб. Національний університет "Львівська політехніка". – 2008. – Вип.69. – С.90-96.
10. Друль Я.Г. Подільники тиску: моделювання і можливості застосування / Я.Г.Друль, З.М.Теплюх, І.В.Ділай // Праці Луганського

- відділення Міжнародної Академії інформатизації. – 2009. – №2 (19), част.1. – С.51-54.
11. 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.
  12. Ділай І.В. Дослідження капілярних подільників тиску для складних дросельних систем / І.В.Ділай, З.М.Теплюх, Р.Б.Брилинський // Технологічний аудит і резерви виробництва. – 2014. – Т. 5, № 2(19). – С.9-14.  
(входить в міжнародну наукометричну базу Copernicus)
  13. Ділай І.В. Газодинамічний синтезатор для калібрування хроматографів на природний газ / І.В.Ділай, З.М.Теплюх // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ. – 2009. – Вип. 23. – С.49-54.
  14. Ділай І.В. Газодинамічний метод визначення діаметра капіляра / І.В.Ділай, З.М.Теплюх // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація". – 2010. – № 677. – С.128-134.
  15. Ділай І.В. Автоматизація плівкового витратоміра / І.В.Ділай, З.М.Теплюх, Ю.Б.Гірняк // Вісник Винницького політехнічного інституту. – 2011. – №4(97). – С.14-18.
  16. Ділай І.В. Задавач-стабізатор витрати газу-носія для хроматографа / І.В.Ділай, З.М.Теплюх // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація". – 2006. – № 561. – С.67-70.
  17. Ділай І.В. Моделювання паралельного з'єднання дросельних елементів / І.В.Ділай // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація". – 2013. – № 758. – С.192-198.
  18. Ділай І.В. Оптимальні дросельні схеми динамічних систем приготування складних газових сумішей / І.В.Ділай, З.М.Теплюх, Ю.З.Вашкурак // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – Т.4, № 8(70). – С.39-45. (входить в міжнародну наукометричну базу Copernicus)
  19. Ділай І.В. Контроль справності системи сигналізації загазованості приміщень метаном / І.В.Ділай, З.М.Теплюх, Є.І.Новошицький, О.І.Ціцюра // Науковий Вісник НЛТУ України. – Львів. – 2013. – Вип.23.8. – С.131-137.
  20. Ділай І.В. Розрахунок і оптимізація конструкції мірних трубок плівкових витратомірів / І.В.Ділай, О.З.Парнета, З.М.Теплюх // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація". – 2007. – № 581. – С.104-111.
  21. Парнета О.З. Дослідження поверхневих явищ у плівковій витратомірі / О.З.Парнета, З.М.Теплюх, І.В.Ділай // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація". – 2011. – № 712. – С.83-90.
  22. Теплюх З.М. Наближення температурної залежності в'язкості поширених



- газів для умов лабораторних приміщень / З.М.Теплюх, І.В.Ділай // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія докiлля. Автоматизація". – 2005. – № 537. – С.161-165.
23. Теплюх З.Н. Задатчик расхода газа-носителя в хроматографе / З.Н.Теплюх, І.В.Ділай// Датчики и системы. – 2012. – № 2. – С.41-44.  
(зарубіжне наукове видання)
24. Ділай І.В. Дросельні синтезатори газових сумішей заданого складу / Ділай І.В., Теплюх З.М. //Матеріали ІІІ міжнар. наук.-техн. конф. "Світлотехніка й електроніка: історія, проблеми й перспективи", 20-22 травня 2008 р.Тернопіль: ТДТУ ім.І.Пулюя, с.91-92.
25. Ділай І.В. / Газодинамічні дросельні пристрої для хроматографа / І.В.Ділай, З.М.Теплюх // Збірка тез доп. за матеріалами МНТК "Датчики, прилади та системи - 2008", Черкаси-Гурзуф, вересень 2008, с.67-68.
26. Ділай І.В. Підвищення точності газового аналізу в енергетиці / І.В.Ділай, З.М.Теплюх // Збірник праць 5-ї міжнар. наук.-практ. конф. "Проблеми економії енергії". Львів: НВФ "Українські технології". – 2008, с.22-31.
27. Ділай І.В. Перспективні засоби для хроматографічного аналізу газів в енергетиці / І.В.Ділай, З.М.Теплюх //Сб. научн. тр. по материалам междунар. конф. "Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития '2008". Т. 3. Техн. науки – Одесса: Черноморье, 2008, с.37-39
28. Ділай І.В. Контроль складу природного газу / І.В.Ділай, З.М.Теплюх, Р.Б.Брилинський // V Міжнар. наук.-техн. конф. "Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання". 2-5 грудня 2008р., Івано-Франківськ. Зб. тез доповідей. – Івано-Франківськ: НТУНГ. – 2008, с.174-176.
29. Теплюх З.М. Пристрій для розчинення вибухонебезпечної газової суміші / З.М.Теплюх, Приміський В.П., І.В.Ділай, Я.Г.Друль // VIII Міжнародна науково-технічна конференція "Приладобудування 2009: стан і перспективи". 28-29 квітня 2009 р. Київ. – Збірник тез доповідей. Київ: НТУУ "КПІ", 2009, с.142-143.
30. Добушовська І.А. Перевірювальні газові суміші для хроматографів димових газів / І.А.Добушовська, О.О.Кулик, З.М.Теплюх, І.В.Ділай // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2009) //Зб. матеріалів 2-ої міжнар. наук.-практ. конф., 25-28 травня 2009 р. – Київ, 2009, с.67-68.
31. Теплюх З.М. Газозмішувальні пристрої для автоматизованого задання концентрацій компонентів сумішей / З.М.Теплюх, І.В.Ділай, Я.Г.Друль // Наукові дослідження – теорія та експеримент 2009 / Матеріали 5-ої між нар. наук.-практ. конф., 18-20 травня 2009 р. Т.6. Полтава: ІнтерГрафіка. – 2009, с.30-33.
32. Ділай І.В. Плівковий витратомір з мікропроцесорним керуванням / І.Ділай, Теплюх З.М., Ю.Гірняк, О.Парнета // Сучасні комп'ютерні системи та мережі: розробка та використання. Матеріали 4-ої міжн. наук.-техн. конф.

- ACSN'2009. Львів-2009, с.225-228.
33. Теплюх З.М. Задавач тисків для засобів газоаналітичної апаратури / З.М. Теплюх, В.П.Приміський, І.В.Ділай, Р.В.Башук // 9-а Міжнародна наук.-техн. конф. "Приладобудування 2010: стан і перспективи". 27-28 квітня 2010 р. Київ /Збірник тез доповідей. – С.136-137.
  34. Ділай І.В. Встановлення рівності газодинамічних опорів дроселів / І.В.Ділай, З.М.Теплюх, В.І.Гула // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ПРТК). Третя міжнар. наук.-практ. конф. 24-26 травня 2010 р., Київ, Україна / Збірник тез. – К.: НАУ, 2010, с.131-132.
  35. Ділай І.В. Підвищення точності аналізу хроматографіями димових газів / І.В.Ділай, З.М.Теплюх // Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні: Матеріали Шостої міжнар. наук.-практ. конф. Львів, 7-8 квітня 2011 р. Зб. наук. статей. – С.178-182.
  36. Теплюх З.М. Структурна оптимізація в задачах синтезу складних газових сумішей / З.М.Теплюх, І.В.Ділай // XVII International Conference "Problems of decision making under uncertainties (PDMU-2011)". Abstracts. May 23-27, 2011, Ukraine. S.190.
  37. Теплюх З.М. Високоточний інтелектуальний синтезатор багатокomпонентних газових сумішей з широким діапазоном концентрацій компонентів / З.М.Теплюх, І.В.Ділай, Ю.Б.Гірняк, О.З.Парнета // Автоматика / Automatics – 2011. ХУІІІ Міжнар. конф. з автоматичного управління. Матеріали конференції. 28-29 вересня 2011р. Львів: Вид-во Львівської політехніки, с.248-249.

### АНОТАЦІЯ

**Ділай І.В. Розвиток газодинамічного методу та високоточних систем для приготування складних сумішей з мікроконцентраціями компонентів.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Львів, 2015.

У дисертації висвітлене нове вирішення науково-прикладної проблеми – синтез високоточних систем неперервного приготування складних газових сумішей з мікроконцентраціями компонентів, що стало можливим завдяки застосуванню розробленої концепції, яка передбачає зокрема, дозування чистих компонентів за допомогою капілярів з суттєво різними провідностями та перепадами тисків на них, співвідношення між якими відповідає концентраціям компонентів у синтезованій суміші. Концепція реалізована у синтезаторах на основі системи із змішувача газових потоків, побудованого на лінійних дозуючих капілярах, і блоку живлення, на основі каскадного з'єднання лінійних подільників тисків (поєднання подільників потоків і тисків з суматором потоків), а також з використанням розроблених газодинамічних систем підбору кратних капілярів з

кратними провідностями і камер з кратними об'ємами. Розроблений метод синтезу високоточних систем неперервного приготування складних сумішей з мікроконцентраціями компонентів забезпечує малу похибку задання потрібних концентрацій компонентів суміші, а також малу похибку підтримання цих концентрацій, зокрема завдяки компенсації можливих змін тисків живлення. Встановлені умови, які забезпечують мінімальну похибку підбору кратних елементів систем синтезу і показано, що вона визначається в основному чутливістю газодинамічних схем з показником рівноваги перепадів тисків чи протічного типу, а також одержані відповідні аналітичні залежності. Оцінені похибки приготування сумішей з мікроконцентраціями компонентів за допомогою розроблених газодинамічних синтезаторів. Основні результати роботи впроваджені на Добротвірській ТЕС для контролю шкідливих викидів в димових газах.

**Ключові слова:** мікроконцентрації компонентів, складна газова суміш, капіляр, задання мікровитрат, газодинамічна провідність, опір.

### Summary

**Dilay I.V. The development of gas-dynamical method and precision systems for complex mixtures preparation with component micro-concentrations.** – Manuscript.

Thesis for the doctor's degree of engineering science in specialty 05.11.13 – Devices and methods of control and determination of substance composition. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2015.

In the dissertation the new solving of scientific and technical problem– synthesis of precision systems for complex gas mixtures with component micro-concentrations unceasing preparation has been represented. This enabled due to application of developed conception, in particular pure components dosage with throttles of significantly different conductivity and pressure drops applying. Their interrelation accords the components concentrations in synthesized mixture. The conception has been realized in synthesizers and based on system of gas flow mixer, constructed on linear dosing capillaries and supply block, realized on the basis of the linear pressure dividers cascade connection (flow and pressure dividers and flow adder combination). Also the designed gas-dynamical systems of aliquot capillaries selection with aliquot conductivity and loculus with aliquot volumes have been used. The developed method for synthesis of precision systems for complex gas mixtures with component micro-concentrations unceasing preparation provides a small error of required concentrations mixture components task, also concentrations maintenance, in particular due to the compensation of supply pressures possible changes. The conditions for providing of minimum error of aliquot elements synthesis systems selection have been setted. That error was determined basically by the gas-dynamical schemes sensitivity with pressure drop indicator balance or flow type. Also the appropriate analytical dependences have been obtained. Due to the developed gas-dynamical synthesizers errors of gas mixtures

with micro-concentration components preparation have been estimated. The basic results of the work were applied in Dobrotvir thermoelectric power station for harmful exhaust control in flue gases.

**Key words:** component micro-concentrations, complex gas mixture, capillary, micro flow rate setting, gas-dynamical conductivity, resistance.

### АННОТАЦИЯ

**Дилай И.В. Развитие газодинамического метода и высокоточных систем для приготовления сложных смесей с микроконцентрациями компонентов.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля и определения состава веществ. – Национальный университет «Львівська політехніка», Министерство образования и науки Украины, Львов, 2015.

В диссертации решена актуальная научно-техническая проблема – построение высокоточных систем приготовления газовых смесей с микроконцентрациями компонентов с использованием газодинамического дроссельного метода смешения дозированных газовых потоков.

Анализ распространенных дроссельных методов и устройств приготовления газовых смесей показал, что существенным их недостатком является сложность реализации, связанная с необходимостью использования большого количества дозирующих дросселей (тысячи и сотни) с равными или кратными газодинамическими сопротивлениями (проводимостями) для обеспечения микроконцентрации компонентов. Это, в частности, объясняется тем, что используемые в газодинамических синтезаторах дроссельные элементы дозируют газовые компоненты при одинаковых перепадах давления на них. Кроме того, необходимость большого количества дозирующих дроссельных элементов для построения синтезаторов смесей с микроконцентрациями компонентов сильно усложняет его реализацию. Известный подход решения этой задачи приготовления смесей в диапазоне микроконцентраций предлагает использование многостадийного разбавления компонентов, что сопровождается сбрасыванием значительной части промежуточных смесей и соответственно потерей чистых газовых компонентов. Это обстоятельство приводит к снижению эффективности получения смесей в диапазоне микроконцентраций компонентов.

Разработаны новые методы и системы синтеза газовых смесей, обеспечивающие синтез сложных многокомпонентных смесей в диапазоне микроконцентраций отдельных компонентов на одной стадии при использовании небольшого количества (до десятка) капилляров. Получение таких смесей стало возможным за счет применения новой концепции приготовления, состоящей в использовании дозирующих дроссельных элементов синтезаторов с соотношением проводимостей на уровне трёх порядков. Для этого, с одной стороны, предложено увеличивать проводимость капиллярных элементов,

дозирующих газы с макроконцентрациями в смеси, а с другой – увеличивать сопротивление тех капилляров, которые дозируют компоненты, находящиеся на уровне микроконцентраций. Кроме того, до трёх порядков можно устанавливать соотношение перепадов давлений на дозирующих капиллярных элементах, что обеспечивает концентрацию компонента смеси на нижнем уровне диапазона микроконцентраций.

Реализация концепции осуществлена за счет разработки устройств, построенных на основе мостовой и дифференциальной дроссельных схем и блока стабилизированных давлений питания. Исследована чувствительность мостовых дроссельных схем при использовании двух типов индикаторов равновесия схемы (перепада давления и наличия потока в выходной диагонали) и установлено, что погрешность подбора капиллярных элементов с равными газодинамическими сопротивлениями находится на уровне 0,02 %.

Построены математические модели и исследована динамика изменения разницы давлений в камерах дифференциальной схемы в процессе подбора капилляров, дозирующих различные газы, что позволяет уменьшить время подбора сопротивлений капилляров. На основании полученных результатов исследования базовых соединений (последовательное, параллельное, каскадное) капилляров построены математические модели многоэлементных дроссельных делителей давления. Особенное место среди них занимают линейные многоэлементные делители, которые обеспечивают однонаправленное пропорциональное изменение междроссельных давлений при возможных изменениях давления на входе делителя. Каскадное соединение линейных делителей давления (сочетание делителей потока и давления с сумматорами потоков) обеспечило построение блоков стабилизированных источников питания, которые дают возможность задавать существенно разные перепады давления на дозирующих капиллярах смесителя газодинамического синтезатора. Кроме того, исполнение дозирующих капилляров смесителя синтезатора с линейными расходными характеристиками обеспечивает компенсацию изменения давления на входе блока стабилизированного питания.

Разработаны синтезаторы газовых смесей с микроконцентрациями компонентов, в частности, для проверки сигнализаторов угарного газа, градуировки газоанализаторов чистоты аргона, а также синтезатор «метан-воздух» для самоконтроля исправности сигнализации вытекания метана в помещении компрессорного отделения газонаполнительной станции. Оценены погрешности задания микроконцентраций компонентов сложных смесей, и установлено, что граничная погрешность задания концентраций компонентов газодинамическим синтезатором, построенном на капиллярах с кратными проводимостями (сопротивлениями) не превышает 0,5 %.

**Ключевые слова:** газодинамический синтезатор, сложные многокомпонентные смеси, микроконцентрации компонентов, капилляр, блок стабилизированных давлений питания, газодинамическое сопротивление.