

## СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО СТВОРЕННЯ ІНФРАЧЕРВОНИХ ГАЗОАНАЛІЗАТОРІВ ДЛЯ АНАЛІЗУ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

С.П.Ващишак, В.М.Романів, С.А.Чеховський

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422)

e-mail: ivt@nung.edu.ua

*Рассмотрены существующие измерительные схемы и типы кювет ИЧ-газоанализаторов и предложена новая измерительная схема, что дает возможность снизить погрешности измерений, связанные с неидентичностью источников ИЧ-излучения. Для повышения чувствительности кювет их измерительные участки предлагается делать кольцевидными, что приводит к существенному повышению оптической длины кювет.*

*Разработана конструкция измерительной части ИЧ-газоанализатора, который монтируется непосредственно в газопровод и структурную схему поточного многоканального инфракрасного газоанализатора, что имеет возможность определять компонентный состав и теплотворную способность природного газа.*

Якість значної частини продукції сучасного виробництва залежить від характеристик природного газу, який є продуктом або носієм енергії для швидкоплинних технологічних процесів на хімічних та металургійних підприємствах. Основними з цих характеристик є компонентний склад та теплотворна здатність. Однак, у процесах тонкого органічного синтезу, виплавки сталей із спеціальними характеристиками та отримання матеріалів для електронної промисловості, крім вказаних характеристик, дуже важливу роль відіграє час, на протязі якого відбуваються хімічні реакції. Існуючі прилади для визначення характеристик природного газу (спектрофотометри, хроматографи, поточкові хроматографи) мають значну вартість, низьку швидкодію та вимагають для роботи попередньої підготовки проб. Крім того, ці прилади є досить складними в обслуговуванні, а для їх розміщення потрібні спеціальні приміщення з мікрокліматом, що не дає змоги застосовувати їх для швидкого аналізу характеристик газу безпосередньо на газопроводах.

Визначення якісних характеристик природного газу з високою швидкодією можна проводити інфрачервоними (ІЧ) газоаналізаторами, застосовувавши їх для аналізу компонентного складу. У таких газоаналізаторах як вимірювальні ділянки застосовують спеціальні кювети, в яких аналіз компонентного складу відповідних газів здійснюється шляхом поглинання ними енергії ІЧ-хвиль у певному діапазоні частот. Основними перевагами ІЧ-газоаналізаторів є їх простота, висока швидкодія та низька вартість. До основних недоліків слід віднести наявність рухомих частин з оптичними фільтрами, низьку чутливість, доволі широку робочу смугу, яка не дає змоги чітко налаштуватись на конкретну частоту поглинання компоненти природного

*In the given article existent measuring charts and types of cuvettes of IR- gaz analyzers are considered and a new measuring chart is offered, that enables to lower the errors of measuring, related to no the identity of sources of IR-radiation. For the rise of sensitiveness of cuvettes it is suggested to do their measuring areas by roll, that results in the substantial rise of optical length of cuvettes.*

*Construction of measuring part of IR- gaz analyzer which is assembled directly in a gas pipeline and flow diagram of potoc multichannel infra-red gaz analyzer is developed, that is in a position to determine component composition and heating value of natural gas.*

газу, та залежність параметрів оптичної системи від температури. Ці недоліки до останнього часу не давали змоги використовувати ІЧ-газоаналізатори для аналізу компонентного складу природного газу.

Однак, останнім часом з'явилися переналаштовувані діодні лазери (ПДЛ) для діодної лазерної спектроскопії [1] з широкою спектральною областю перекриття (від 0,7 до 47 мкм), високою чутливістю до зміни оптичної густини ( $10^{-7}$ ), низькою потужністю (менше 1 мВт), вузькою лінійною генерації (на рівні 0,005 мкм). Електронне керування характеристиками випромінювання ПДЛ дає змогу повністю автоматизувати системи на їх основі, а мала інерційність допускає застосування високих швидкостей керування частотою випромінювання. Це дає змогу отримувати високі аналітичні характеристики при використанні простих функціональних схем приладів. Мініатюрність ПДЛ дозволяє інтегрувати їх у багатоконпонентні аналітичні системи як джерела випромінювання і з високою швидкістю і точністю налаштуватись на необхідну робочу частоту.

Таким чином, актуальним завданням є створення ІЧ-газоаналізатора, який би мав можливість вимірювати компонентний склад та визначати теплотворну здатність природного газу з високою швидкодією у технологічних трубопроводах середнього тиску. Для вирішення цього завдання необхідно зробити наступне: розробити оптимальну вимірювальну схему, суттєво підвищити чутливість, розробити конструкцію та структурну схему газоаналізатора.

Згідно з законом Бугера-Ламберта-Бера газу, що складаються з 2-х молекул ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$  та ін.) мають властивість поглинати ІЧ-випромінювання на довжинах хвиль, характерних для кожного газу [2]. Молярний пито-

мий коефіцієнт поглинання, при цьому, для кожної з компонент природного газу знаходиться з виразу

$$\varepsilon = \frac{A}{C \cdot l}, \quad (1)$$

де:  $C$  – молярна концентрація;  $l$  – довжина лінії поглинання;  $A$  – коефіцієнт пропускання.

Коефіцієнт пропускання для виразу (1) розраховується з формули

$$A = -\lg\left(\frac{I}{I_0}\right) = \lg\left(\frac{I_0}{I}\right), \quad (2)$$

де:  $I_0$  – інтенсивність ІЧ-випромінювання на вході лінії поглинання;  $I$  – інтенсивність ІЧ-випромінювання на виході лінії поглинання.

З формул (1) та (2) випливає вираз для визначення молярної концентрації компоненти природного газу

$$C = \frac{A}{\varepsilon \cdot l} = K \cdot A = K \cdot \lg\left(\frac{I_0}{I}\right), \quad (3)$$

де  $K = \frac{1}{\varepsilon \cdot l}$  – безрозмірний коефіцієнт.

Для визначення концентрації компоненти природного газу  $C$  в сучасних ІЧ-газоаналізаторах застосовуються однокюветна або двокюветна схеми вимірювань.

При застосуванні однокюветної схеми газовий потік пропускається через внутрішній об'єм кювети і попадає під дію джерела ІЧ-випромінювання. ІЧ-промінь від випромінювача, пройшовши через ІЧ-фільтр матиме інтенсивність  $I_0$ , приймач якої знаходиться на вході лінії поглинання. На виході лінії поглинання розміщено другий приймач, який фіксуватиме інтенсивність  $I$ . У цьому випадку молярна концентрація шуканої компоненти природного газу  $C$  знаходиться за виразом (3).

Однак, чутливість кювети при такій схемі вимірювань є досить низькою, оскільки доволі складно виготовити вимірювальну ділянку значної довжини. Крім того, необхідно враховувати коефіцієнт теплового видовження корпусу кювети, який при значних її розмірах буде впливати на похибку вимірювань. Також потрібно усунути вібрацію кювети та зменшити вплив температури середовища на передавач і приймач ІЧ-випромінювання.

Для підвищення чутливості кювети, тобто збільшення довжини ходу променя без збільшення її геометричних розмірів застосовуються відбиваючі дзеркала, розміщені у кінці кювети. При цьому приймач і джерело ІЧ-випромінювання будуть розміщені на початку кювети, на вході лінії поглинання. У цьому випадку чутливість кювети зростає вдвічі. Однак, навіть таке зростання чутливості не дає змоги вимірювати компоненти природного газу, молярна концентрація яких у газовому потоці є низькою.

Для суттєвого збільшення чутливості застосовують двокюветну схему вимірювань. При цьому, одна кювета застосовується як еталонна, а друга – як вимірювальна. Через вимі-

рювальну кювету постійно пропускається газовий потік. У еталонну кювету під певним тиском закачується відповідний компонент природного газу з відомою концентрацією.

У двокюветній схемі для зменшення похибки вимірювань доцільно використати одне джерело ІЧ-випромінювання, для двох кювет одночасно. Але ІЧ-фільтри та приймачі ІЧ-випромінювання на початку і у кінці ліній поглинання у кожній з двох кювет застосовуються свої.

При двокюветній схемі вимірювань виникають похибки, пов'язані з неоднаковими характеристиками приймачів ІЧ-випромінювання та впливом на них температури. Для зменшення цих похибок опишемо процеси, що виникають у кюветах при проведенні вимірювань.

Запишемо формули згідно з виразом (3) для еталонного та вимірювального трактив двокюветної схеми вимірювань:

$$\begin{cases} C_e = K \cdot \lg(I_{0e}) - K \cdot \lg(I_e) \\ C = K \cdot \lg(I_0) - K \cdot \lg(I) \end{cases}, \quad (4)$$

де:  $I_{0e}$  – інтенсивність ІЧ-випромінювання на вході лінії поглинання еталонної кювети;

$I_0$  – інтенсивність ІЧ-випромінювання на вході лінії поглинання вимірювальної кювети;

$I_e$  – інтенсивність ІЧ-випромінювання на виході лінії поглинання еталонної кювети;

$I$  – інтенсивність ІЧ-випромінювання на виході лінії поглинання вимірювальної кювети.

Враховуючи, що для обох трактив коефіцієнт  $K$  та джерело світла є однаковими, і віднявши одне рівняння від другого отримаємо розрахункову формулу для шуканої концентрації компоненти  $C$  природного газу у двокюветній схемі вимірювань:

$$C = C_e - K \cdot \lg\left(\frac{I}{I_e}\right). \quad (5)$$

У даній формулі величина  $C_e$  – відома, а значення  $I$  і  $I_e$  отримуються за допомогою безпосередніх вимірювань.

Як видно з виразу (5) при двокюветній схемі вимірювань немає необхідності вимірювати інтенсивність ІЧ-випромінювання на входах ліній поглинання кювет, тому, що як результат вимірювань тут приймається різниця інтенсивностей ІЧ-випромінювання, поглинутого газом у вимірювальній та еталонній кюветах. Приймачі ІЧ-випромінювання при двокюветній схемі вимірювань доцільно розміщувати тільки на виходах ліній поглинання кожної з кювет.

Однак двокюветна схема вимірювань має і певні недоліки. По-перше, це необхідністю корекції по температурі та тиску газу, що знаходиться в еталонній кюветі. По-друге, необхідність лабораторного дослідження величини  $\varepsilon$ . По-третє, це значний динамічний діапазон вимірювань, оскільки концентрація досліджуваної компоненти у газовому потоці може суттєво змінюватись по відношенню до її концентрації в еталонній кюветі. Крім того, чутливість кювет все одно залишається низькою.

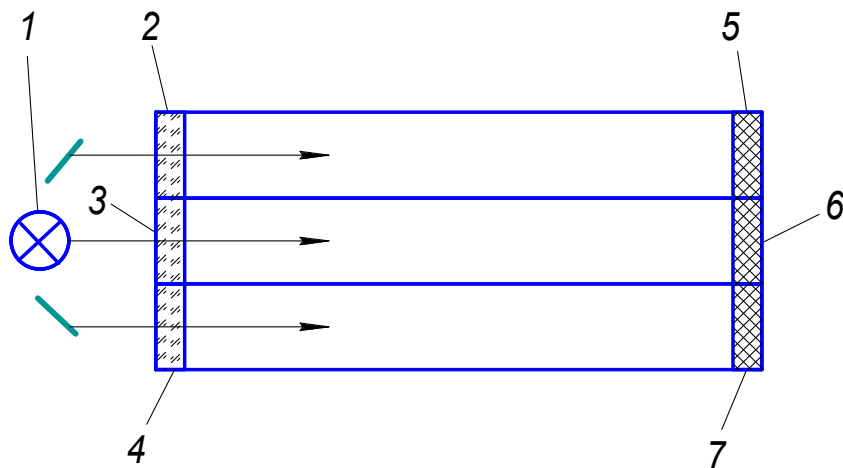


Рисунок 1 — Конструкція кювет для трикюветної схеми вимірювань концентрації компоненти природного газу С

Для ліквідації вказаних недоліків нами запропонована трикюветна схема вимірювань [3]. У цій схемі необхідно використати дві еталонні і одну вимірювальну кювети (рис. 1). Тут в одну з еталонних кювет закачується відповідний компонент природного газу з максимальною концентрацією, яка можлива у газовому потоці, а в іншу – з мінімальною. Процес вимірювання у трикюветній схемі подібний до двокюветної. Суть вимірювань за допомогою трикюветної схеми полягає у пропусканні ІЧ-випромінювання від одного джерела 1 (через ІЧ-фільтри 2 – 4) одночасно через три кювети і порівнянні ступеня поглинання випромінювання після проходження ним кожної з кювет, прийнятого приймачами 5 – 7. При цьому газовий потік пропускається тільки через вимірювальну кювету.

Відповідно до наведеного вище запишемо формулу (3) для трьох вимірювальних трактів:

$$\begin{cases} C = K \cdot \lg(I_0) - K \cdot \lg(I) \\ C_{e1} = K \cdot \lg(I_{0e1}) - K \cdot \lg(I_{e1}) \\ C_{e2} = K \cdot \lg(I_{0e2}) - K \cdot \lg(I_{e2}) \end{cases}, \quad (6)$$

де:  $I_{0e1}$  – інтенсивність ІЧ-випромінювання на вході лінії поглинання еталонної кювети 1;

$I_{0e2}$  – інтенсивність ІЧ-випромінювання на вході лінії поглинання еталонної кювети 2;

$I_{e1}$  – інтенсивність ІЧ-випромінювання на виході лінії поглинання еталонної кювети 1;

$I_{e2}$  – інтенсивність ІЧ-випромінювання на виході лінії поглинання еталонної кювети 2.

Враховуючи, що для всіх трьох трактів джерело ІЧ-випромінювання і коефіцієнт  $K$  однакові і віднявши від другого рівняння системи перше та від третього – друге, після перетворень отримаємо вираз для визначення концентрації компоненти природного газу С:

$$C = C_{e1} - (C_{e2} - C_{e1}) \cdot \frac{\lg\left(\frac{I}{I_{e1}}\right)}{\lg\left(\frac{I_{e1}}{I_{e2}}\right)}. \quad (7)$$

Основною перевагою трикюветної схеми вимірювань є відсутність будь-яких попередніх лабораторних досліджень. Уся необхідна інформація отримується шляхом безпосередніх вимірювань. Крім того, звужується динамічний діапазон вимірювань, оскільки тепер вони проводяться між мінімальною і максимальною концентраціями компоненти у еталонних кюветках.

Основним недоліком цієї вимірювальної схеми є її низька чутливість. Для суттєвого підвищення чутливості кювет необхідно, щоб довжина ходу ІЧ-випромінювання у них була максимальною. А для того, щоб кювети могла працювати у газоаналізаторі на реально діючому газопроводі, до них ставились наступні вимоги: мінімальні розміри, максимальна довжина ходу оптичного променя, простота, надійність та вибухобезпечність конструкції.

Провівши моделювання процесу поширення ІЧ-променя у кюветах різних форм ми прийшли до висновку, що найкраще наведені умови задовольняє кільцеподібна кювета з багаторазовим відбиванням ІЧ-променя (рис. 2). Кювета побудована у вигляді кільцеподібної конструкції прямокутного перерізу, всередині якої розміщено компенсатор тиску. Зовнішня поверхня компенсатора тиску є внутрішньою відбиваючою поверхнею ІЧ-променя кювети і має радіус  $R_B$ , а зовнішня відбиваюча поверхня кювети має радіус  $R_3$ . ІЧ промінь від джерела, яке розміщено у точці  $O'$  вводиться у кювету під кутом  $\alpha$  від вертикалі. При проходженні променя ІЧ-випромінювання відбувається багаторазове його відбивання від внутрішньої і зовнішньої поверхонь кювети (точки a, b, c).

Розглянемо трикутник  $OaO'$ . Згідно з теоремою синусів кут  $\beta$  буде дорівнювати:

$$\beta = \arcsin\left(-\frac{R_3}{R_B} \times \sin \alpha\right) + 90^\circ. \quad (8)$$

Відповідно, полярний кут положення точки відбиття буде складати

$$\gamma = 180^\circ - (\beta + \alpha). \quad (9)$$

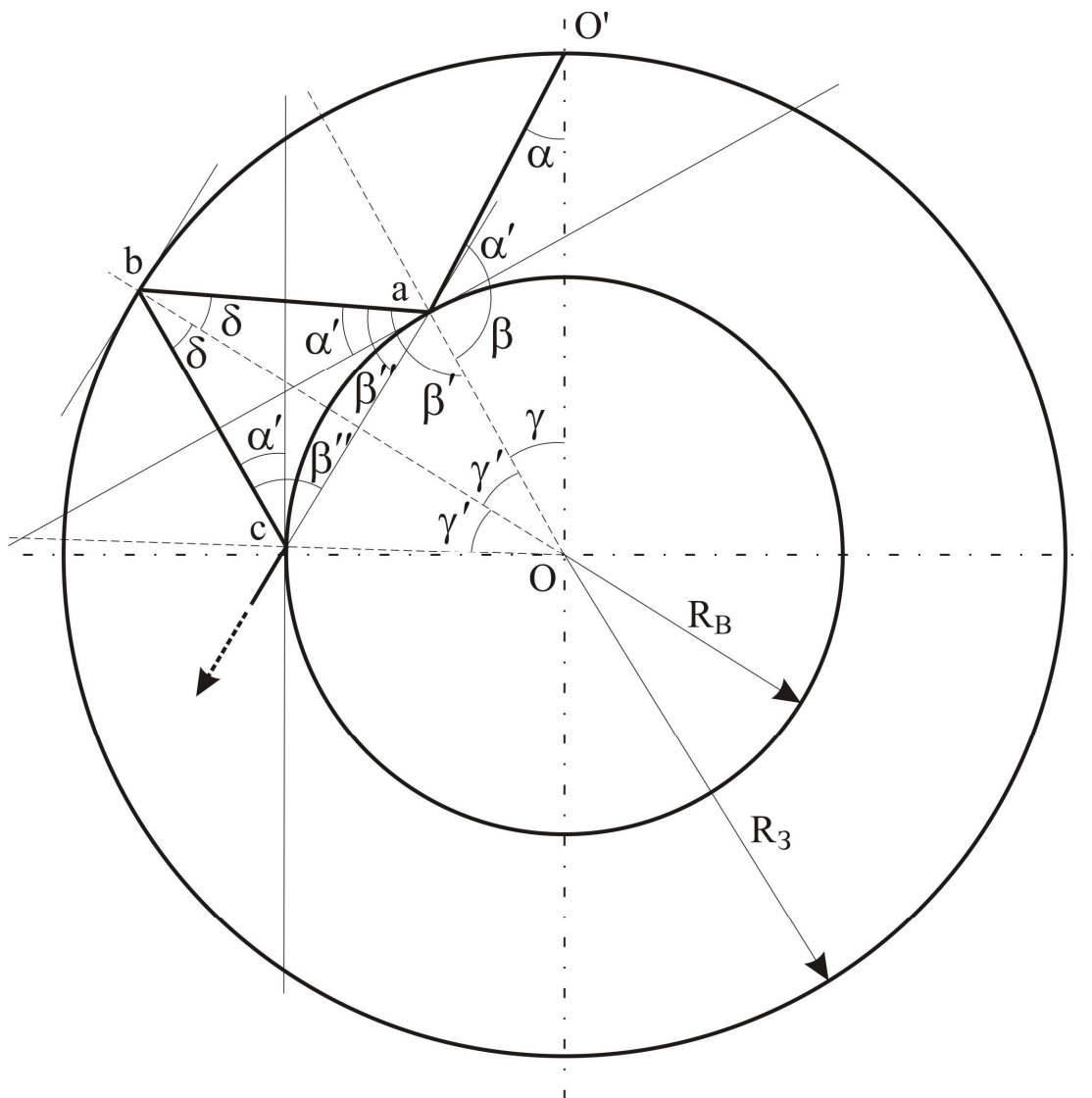


Рисунок 2 — Розрахункова схема кільцеподібної кювети

Кут падіння променя ІЧ-випромінювання в точці а буде рівним

$$\alpha' = \beta - 90^\circ. \quad (10)$$

Розглянемо трикутники  $OaO'$  і  $Oba$ . Ці трикутники мають одну спільну сторону  $Oa$  і є подібними ( $Ob=OO'=R_3$ ,  $Oa=R_B$ ,  $\beta=\beta'$ ). З подібності трикутників витікає наступне:

$$\beta'' = \beta' - \alpha', \quad (11)$$

$$\gamma' = \gamma; \quad \delta = \alpha. \quad (12)$$

Виходячи з виразів (9), (11), (12), кут падіння променя ІЧ-випромінювання  $\delta$  в точку  $b$  зовнішньої поверхні вимірювальної ділянки кювети буде дорівнювати

$$\delta = 180^\circ - \beta'' - \gamma' = 2\beta + \alpha - 180^\circ. \quad (13)$$

Довжину ходу променя ІЧ-випромінювання від джерела, яке розміщене в точці  $O'$ , до точки відбивання від внутрішньої поверхні вимірювальної ділянки  $a$ , для трикутника  $OaO'$  можна визначити за допомогою теореми синусів

$$aO' = \frac{\sin \gamma}{\sin \alpha} \cdot R_B. \quad (14)$$

Довжина ходу променя після відбивання в точці  $a$  до точки  $b$ , враховуючи подібність трикутників  $OaO'$  і  $Oba$ , буде становити

$$ab = aO'. \quad (15)$$

Враховуючи подібність трикутників  $Oba$  і  $Obc$  довжина ходу променя  $bc$  складатиме

$$bc = ab = aO'. \quad (16)$$

Таким чином, три відбивання по типу (а, b, c) будуть складати полярний кут  $\gamma_3$ , значення якого знаходиться з виразу

$$\gamma_3 = 3\gamma, \quad (17)$$

а довжина ходу променя буде становити

$$l_{\Pi} = 3 \frac{\sin \gamma}{\sin \alpha} R_B. \quad (18)$$

Кількість елементарних відбивань променя ІЧ-випромінювання типу (а, b, c) по повному колу вимірювальної ділянки кювети складатиме

$$n = 360^\circ / 3\gamma = 120^\circ / \gamma. \quad (19)$$

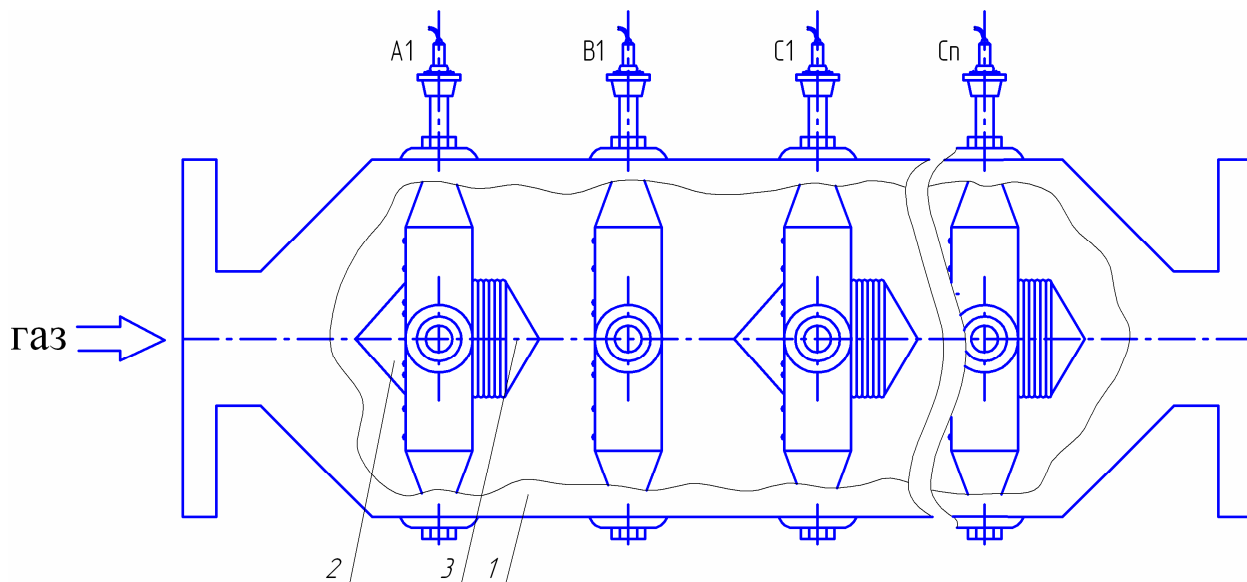


Рисунок 3 — Вимірювальна частина ІЧ-газоаналізатора

Звідки, повна довжина ходу променя на вимірювальній ділянці кювети буде рівною

$$l = l_{\text{п}} \cdot n = \frac{360^\circ}{\gamma} \cdot \frac{\sin \gamma}{\sin \alpha} R_B \cdot \quad (20)$$

Як видно з виразу (20), у кільцеподібній кюветі довжина ходу оптичного променя буде найбільшою і, відповідно, чутливість кювети буде максимальною. Це дає змогу вимірювати концентрацію компонент природного газу на рівні часток відсотка (наприклад С<sub>2</sub>Н<sub>6</sub>, С<sub>3</sub>Н<sub>8</sub>).

Основним недоліком усіх розглянутих кювет є відсутність можливості зрівноважувати тиски і температури у вимірювальних та еталонних кюветах. Це ускладнює розрахунки і вносить додаткові похибки у кінцеві результати досліджень. Для ліквідації цього недоліку нами запропоновано приведення внутрішнього тиску в еталонних кюветах до тиску газового потоку у трубопроводі здійснювати за допомогою компенсатора тиску. Він представляє собою циліндричний сифон (рис. 3), з лінійною пружною характеристикою.

Для забезпечення вибухобезпеки кювет у них відсутні любі види електричних сигналів. Сигнал ІЧ-випромінювання від джерела передається у кювету і надходить на приймач завдяки застосування оптоволоконного кабеля з низьким ступенем оптичного затухання.

Конструкція вимірювальної частини потокового ІЧ-газоаналізатора де застосовано трикюветну схему вимірювання зображена на рис. 3. Всередині трубопроводної вставки з перехідними фланцями 1 для вимірювання однієї компоненти природного газу встановлено по одній вимірювальній В1 та дві еталонні А1, С1 кювети (один вимірювальний канал) з розсіювачами газового потоку 2 та сифонами з приєднаною масою 3. Кількість вимірювальних каналів n відповідає кількості досліджуваних компонент природного газу. Оскільки, завдяки використанню кільцеподібних вимірювальних ділянок кювети мають незначні розміри, то при

їх великій кількості збільшуватиметься тільки поздовжній розмір потокового газоаналізатора.

Структурна схема потокового ІЧ-газоаналізатора зображена на рис. 4. Газоаналізатор складається з джерел ІЧ-випромінювання Д1 – Дn, оптичних систем ОС1 – ОСn, кювет вимірювальних каналів А1, В1, С1 – Аn, Вn, Сn, давачів тиску, температури, витрати і вологості природного газу Р, Т, Q, В, приймачів ІЧ-випромінювання ПА1, ПВ1, ПС1, ПСn, мультиплексорів М1 – Мn, мікропроцесорного контролера МК та пристрою передачі інформації ППІ.

Працює ІЧ-газоаналізатор наступним чином. По команді з контролера МК по чергово вмикаються джерела ІЧ-випромінювання Д1 – Дn кожного з вимірювальних каналів, сигнали з яких надходять на оптичні системи ОС1 – ОСn, які розділяють його на три промені. Пройшовши через вимірювальні ділянки вимірювальної та еталонних кювет кожного з каналів промінь ІЧ-випромінювання попадає на приймачі ПА1, ПВ1, ПС1, ПСn. Одночасно з джерелами мікропроцесорний контролер МК вмикає мультиплексори М1 – Мn для по чергового прийому сигналів від давачів кожного вимірювального каналу. Після цього контролер МК розраховує концентрації кожної з досліджуваних компонент та витрату газу і вводить поправки на зміну тиску, температури та вологості газового потоку, що знімаються безпосередньо з газопроводу давачами Р, Т, Q, В. Розраховані концентрації компонент природного газу передаються до споживача пристроєм передачі інформації ППІ.

Таким чином, описані підходи дають змогу створити потоковий ІЧ-газоаналізатор, що може визначати компонентний склад і теплотворну здатність природного газу та має змогу працювати безпосередньо у газопроводах середнього тиску завдяки відсутності рухомих частин, джерел потужних струмів і напруг, та можливості монтажу усіх кювет всередині однієї

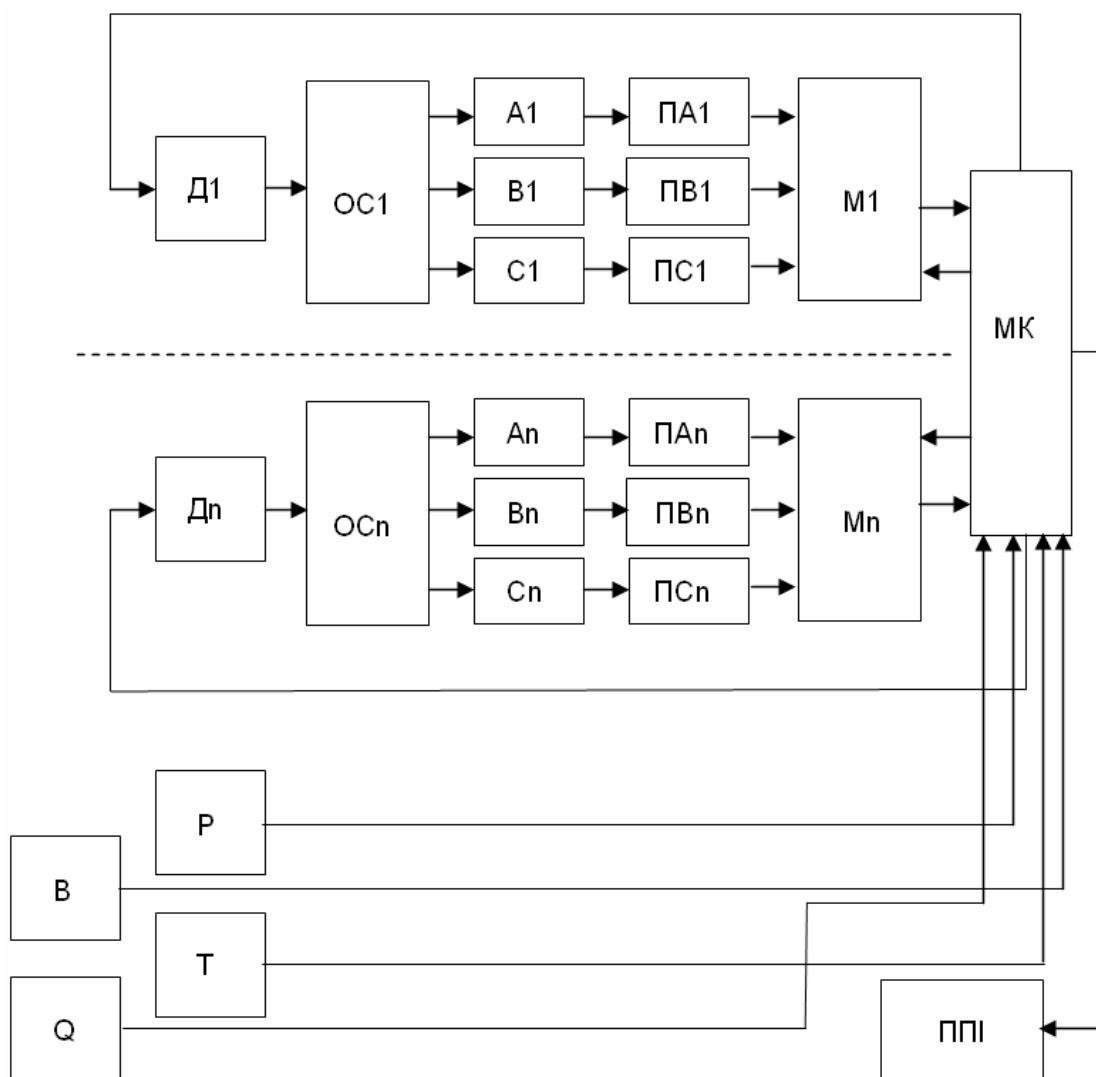


Рисунок 4 — Структурна схема потокового багатоканального інфрачервоного газоаналізатора

трубної вставки. Крім того, перевагами потокового ІЧ-газоаналізатора є:

- можливість одночасного вимірювання кількох компонент природного газу;
- підвищена чутливість кювет завдяки застосуванню кільцеподібних вимірювальних ділянок, що призводить до суттєвого підвищення їх оптичної довжини;
- підвищена точність вимірювань за рахунок використання трикюветної схеми;
- підвищена швидкодія завдяки відсутності попередньої підготовки проб та застосування мікропроцесорного контролера.

#### Література

1 Бинги В.Н., Степанов Е.В., Чучалин А.Г. и др. Высококочувствительный анализ NO, NH<sub>3</sub> и CH<sub>4</sub> в выдыхаемом воздухе с помощью перестраиваемых диодных лазеров // Труды института общей физики им. А.М.Прохорова. – 2005. – Том 61. – С. 189-210.

2 Смит А. Прикладная ИК-спектроскопия / Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 328 с.

3 Ващишак С.П., Романів В.М. Методика розрахунку кювет газоаналізаторів для обліку енерговмісту природного газу // Збірник тез доповідей 6-ої НТК “Приладобудування 2007: стан і перспективи”. – Київ: ПБФ НТУУ “КПІ”, 2007. – С. 307-308.