

**Дудатьєв І.А., Кучерук В.Ю., Кулаков П. І.**

**ЗАСІБ КОНТРОЛЮ КОНЦЕНТРАЦІЇ ДВООКИСУ  
ВУГЛЕЦЮ У ДИМОВИХ ГАЗАХ КОТЕЛЬНИХ  
УСТАНОВОК НА ОСНОВІ ОПТИКО-  
АБСОРБЦІЙНОГО МЕТОДУ**

**Монографія**



Дніпро  
«Середняк Т.К.»  
2021

УДК 621.182:621.311.22(02.064)  
Д 81

Рецензенти:

**О. В. Осадчук**, доктор технічних наук, професор

**О. В. Бісікало**, доктор технічних наук, професор

*Дудатьєв І. А., Кучерук В.Ю., Кулаков П.І.*

**Д81** Засіб контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок на основі оптико-абсорбційного методу. Монографія — Дніпро: Середняк Т. К., 2021, — 120 с.

ISBN 978-617-8010-23-2

В монографії розроблено засіб контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок на основі оптико-абсорбційного методу з покращеними метрологічними характеристиками.

Дослідження, проведені в монографії, дозволили отримати нові, науково-обґрунтовані теоретичні та практичні результати, які є істотними для підвищення точності при необхідній швидкодії процесу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок на основі оптико-абсорбційного методу з компенсацією впливних факторів оптичного перетворювача.

УДК 621.182:621.311.22(02.064)  
Д 81

ISBN 978-617-8010-23-2

© І. Дудатьєв, В. Кучерук, П. Кулаков 2021

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ КОНЦЕНТРАЦІЇ КОМПОНЕНТІВ ДИМОВИХ ГАЗІВ	7
1.1 Особливості димових газів котельних установок як об'єктів контролю	7
1.2 Огляд сучасних методів для визначення концентрації компонентів димових газів	9
1.3 Вибір методу контролю концентрації компонентів димових газів котельних установок	19
1.4 Математичне представлення оптико-абсорбційного інфрачервоного методу	21
1.5 Аналіз схем оптичних засобів контролю концентрації компонентів димових газів котельних установок	24
1.6 Огляд сучасних засобів визначення концентрації компонентів димових газів котельних установок	27
1.7 Постановка задачі та обґрунтування подальших досліджень	31
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИМІРЮВАЧА КОНЦЕНТРАЦІЇ ДВООКИСУ ВУГЛЕЦЮ У ДИМОВИХ ГАЗАХ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК	33
2.1 Аналіз спектрів поглинання сенсорів засобу контролю	33
2.2 Математична модель перенесення випромінювання в середовище димових газів котельних установок	36
2.3 Коефіцієнт поглинання CO <sub>2</sub> у димових газах котельних установок	39
2.4 Математична модель вимірювального перетворювача концентрації двоокису вуглецю в димових газах котельних установок	42
2.5 Рівняння перетворення додаткових вимірювальних каналів	45
2.6 Дослідження коефіцієнту передачі та чутливості оптичного газового сенсора	51
2.6.1 Аналіз коефіцієнту передачі оптичного газового сенсора	51
2.6.2 Дослідження впливу ширини спектру приймача ІЧ випромінювання на чутливість оптичного каналу газового сенсора	51
2.7 Дослідження опорної та робочої довжини хвилі для оптичного газового сенсора та розробка методу адитивно-мультиплікативної компенсації впливних факторів	54
2.8 Висновки до розділу 2	58
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ КОНЦЕНТРАЦІЇ ДВООКИСУ ВУГЛЕЦЮ У ДИМОВИХ ГАЗАХ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК ТА ОЦІНЮВАННЯ ЙОГО МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК	59
3.1 Розробка структурної схеми засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок	59
3.2 Розробка функціональної схеми засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок	60

3.3 Аналіз шляхів подачі димового газу на засіб контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок	61
3.4 Оцінення основних метрологічних характеристик вимірювальних каналів засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок	64
3.5 Аналіз та оцінення похибок вимірювань	74
3.6 Адаптація засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок	75
3.7 Висновки до розділу 3	79
<b>РОЗДІЛ 4 ВИЗНАЧЕННЯ ВІРОГІДНОСТІ КОНТРОЛЮ ТА ДОСТОВІРНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ</b>	<b>80</b>
4.1 Програмна реалізація засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок	80
4.2 Розробка лабораторного зразка та експериментальні дослідження	84
4.3 Дослідження адекватності розробленої математичної моделі	87
4.4 Оцінювання вірогідності контролю та точності вимірювань концентрацій димових газів котельних установок	94
4.5 Висновки до розділу 4	97
<b>ВИСНОВКИ</b>	<b>98</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	<b>100</b>
<b>ДОДАТКИ</b>	<b>114</b>
Додаток А Результати вимірювання напруги, тиску та температури за допомогою лабораторного зразка системи контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок	115
Додаток В Лістинг програми контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок	116
Додаток К Зовнішній вигляд лабораторного зразка	117
Додаток Л Спектри поглинання, ФР, ФД, характеристики ІЧ випромінювачів	118
Додаток М Математичні розрахунки метрологічних характеристик засобу контролю у пакеті Maple V.14	120

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

АСР – автоматична система регулювання;  
АЦП – аналого-цифровий перетворювач;  
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;  
БСВП – блок стабілізації вхідних параметрів;  
ВП – вторинний перетворювач;  
ВП – вимірювальний перетворювач;  
ІВС – інформаційно-вимірювальна система;  
ГС – газоаналітична система;  
ГХ – градуювальна характеристика;  
І – інтерфейс;  
ЕМ – електричний мотор;  
ІНД - індикація;  
КУ – котельна установка;  
ККД – коефіцієнт корисної дії;  
КНП – коефіцієнт надлишку повітря;  
МП - мікропроцесор;  
ОАІЧМ – оптико-абсорбційний інфрачервоний метод;  
ПП – первинний перетворювач;  
ПОІ – пристрій обробки інформації;  
ПЛК – програмований логічний контролер;  
ТРД – терморезистивний датчик;  
ФП – функція перетворення;  
ФЧХ – фазочастотна характеристика;  
ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;  
ЧР – частотний регулятор;  
ШОД – шина обміну даними;  
НГ – засіб відображення;  
УЯКЕ – узагальнений якісний критерій ефективності.

## ВСТУП

Актуальність роботи обумовлена проблемою раціонального використання енергоресурсів в Україні. Ефективність роботи котельних установок прямо залежить від наявності достовірної інформації про хід технологічних процесів. Невисока точність контрольно-вимірювальної апаратури, такої як засіб контролю концентрації компонентів димових газів, може спричинити неефективну роботу установки, зокрема неякісне згорання палива [5].

На даний час існує багато вітчизняних та закордонних засобів контролю концентрації компонентів димових газів, що базуються на різноманітних методах вимірювань (оптичних, механічних, фізичних, хімічних). Але, в багатьох випадках, ці засоби занадто дорогі і, відповідно, термін окупності таких засобів досить великий (до 15 років), що робить їх впровадження на теплопостачальні підприємства не вигідним. З іншого боку, доступніші засоби не можуть забезпечити необхідну точність та достовірність контролю, за рахунок конструктивних недосконалостей або низьких показників метрологічних характеристик, а це є необхідною умовою для ефективної роботи котельної установки [9].

Крім того, вони не відповідають сучасним вимогам адаптивності [64]. Існуючі сучасні засоби контролю концентрації компонентів газів враховують зовнішні збурення, але для повного вирішення задач адаптації необхідно ще враховувати особливості котла, а саме: його оптимальний коефіцієнт надлишку повітря у димових газах котельних установок, що є одним з основних факторів ефективності роботи котельної установки в цілому.

Також потребує вирішення науково-технічне завдання удосконалення методу контролю концентрації компонентів димових газів котельних установок, який би міг забезпечити високу точність при необхідній швидкодії процесу контролю концентрації компонентів димових газів котельних установок, за рахунок вдосконалення існуючих математичних моделей визначення концентрації компонентів газів та інженерно-технічних рішень.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ КОНЦЕНТРАЦІЇ КОМПОНЕНТІВ ДИМОВИХ ГАЗІВ

### 1.1 Особливості димових газів котельних установок як об'єктів контролю

Димові гази котельних установок – це продукти горіння палива, що відходять з робочого простору топки котлоагрегату. Залежність складу димових газів котельних установок від ККД [1] представлена на рис. 1.1.

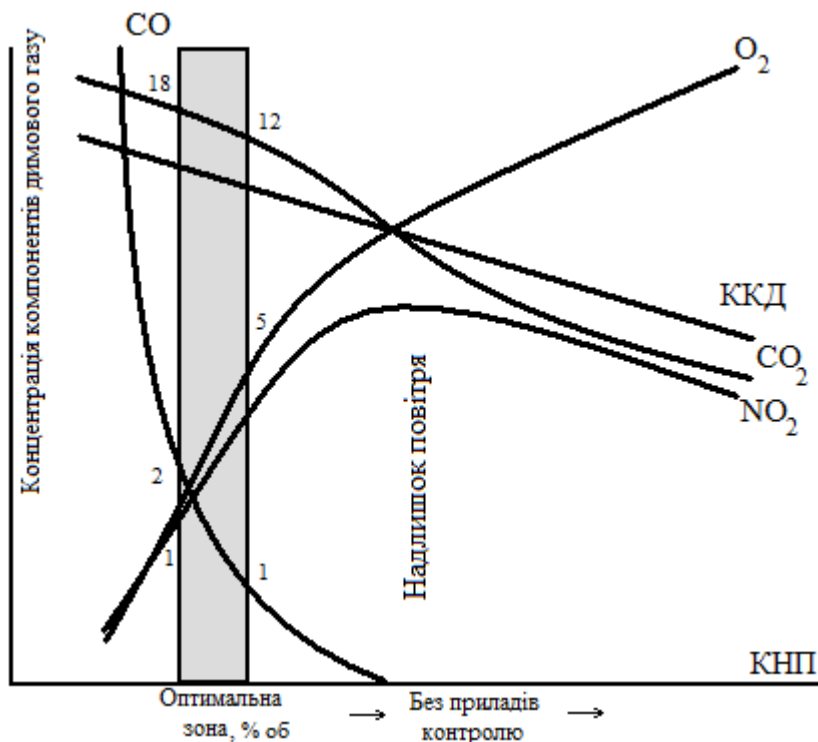


Рис. 1.1. Залежність складу димових газів котельних установок від ККД

Втрати теплоти з газами практично лінійно зростають зі збільшенням коефіцієнта надлишку повітря, що пов'язано зі збільшенням обсягу продуктів горіння (і крім того стає необхідно нагрівати все більше повітря яке не бере участь в реакції горіння). При зниженні коефіцієнта надлишку утворюється нестача повітря і відповідно кисню, що призводить до появи втрат тепла від хімічної неповноти згорання.

Схематичне відображення втрат тепла через неоптимальне співвідношення паливо/повітря [152-153] представлена на рис. 1.2.



Рис. 1.2. Втрати тепла (ККД) котельних установок

Оптимальна зона (зона оптимального горіння) – це така концентрація компонентів, при якій забезпечується спалювання палива з низьким КНП. Наприклад, у роботі [2] для котла ДЕ-25-14 ГМ було встановлено оптимальний КНП, який дорівнює 1,25 ( $\pm 0.01$ ). Збільшення оптимального КНП призводить до підвищення значення концентрації оксидів азоту. При зниженні оптимального КНП збільшується концентрація оксидів вуглецю і, як наслідок, збільшуються втрати з хімічною неповнотою згорання. Головним параметром, що виявляє корегуючу дію на величину надлишку повітря, є вміст залишкового кисню в димових газах. Недостатня кількість повітря викликає неповне згорання продуктів у топці котла, що призводить до перевитрат палива. Надлишок повітря також призводить до перевитрат палива на нагрів зайвого повітря у складі відхідних димових газів [3].

Основні компоненти димового газу котельної установки та їх оптимальна концентрація представлені у табл. 1.1 [4].

Таблиця 1.1

Основні компоненти димового газу котельної установки\*

Компоненти димового газу	Оптимальна концентрація	Примітка
CO	1 – 2 %	Оксид вуглецю
CO <sub>2</sub>	8 – 11 %	Діоксид вуглецю
N <sub>2</sub>	62 – 80 %	Азот
O <sub>2</sub>	2 – 6 %	Кисень
CH <sub>4</sub>	0.01 %	Метан
H <sub>2</sub> O	0 %	Вода у вигляді пари
Атмосферний пил	0 %	Часточки пилу

\*Компоненти димових газів (після усунення впливних факторів до яких відносяться волога, пил, тиск, температура)



Визначення складу продуктів спалювання дає змогу оцінити: ступінь завершеності процесу згорання палива (втрат від хімічної неповноти горіння), умови згорання палива (коефіцієнт надлишку повітря), характер згорання палива в окремих зонах котла (наприклад, наявність компоненту  $\text{CH}_4$  означає нерівність перемішування палива з повітрям, проривок неспаленого газу, наявність локальних низькотемпературних зон), динаміку процесу горіння, дотримання гранично допустимих норм концентрацій викинутих в атмосферу шкідливих речовин [4].

## 1.2 Огляд сучасних методів для визначення концентрації компонентів димових газів

Систематизація методів контролю концентрації компонентів димових газів. На основі зробленого вище огляду методів контролю концентрації компонентів димових газів наведемо їх систематизацію (рис. 1.4)

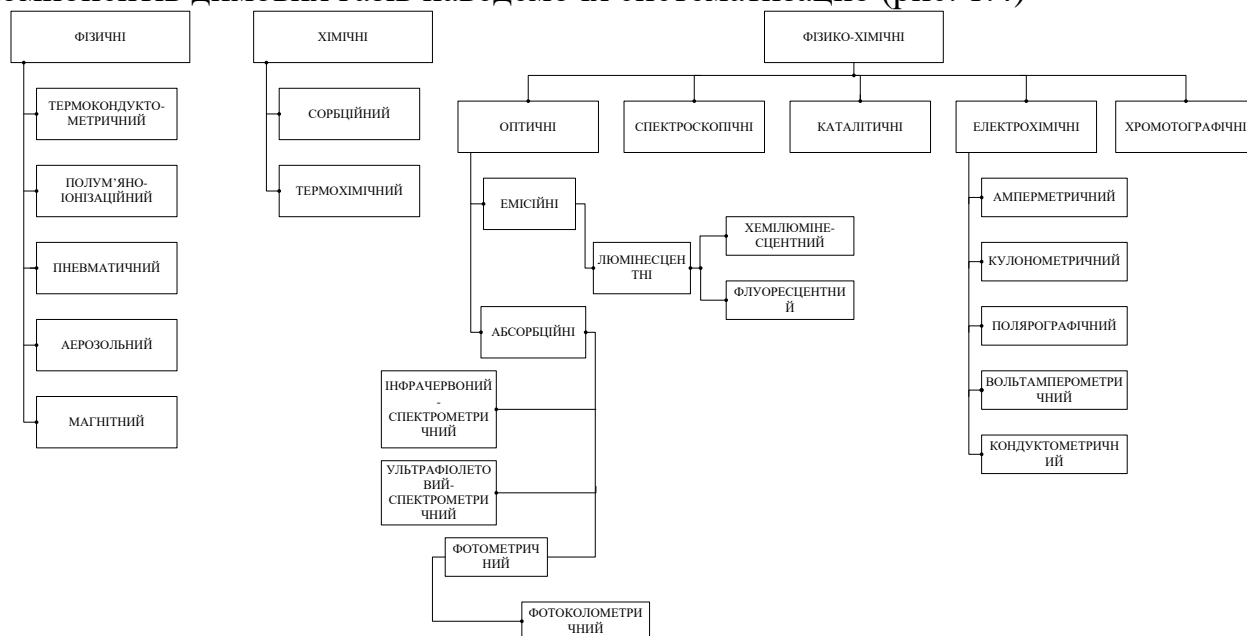


Рис. 1.4. Систематизація методів контролю концентрації компонентів димових газів котельних установок

**Механічні методи.** Варто зазначити, що механічні методи, незважаючи на універсальність, вибірковість і простоту, неприйнятні через низьку чутливість, невисоку точність і значну тривалість аналізу. Область застосування магнітних методів обмежується аналізом газів, які володіють парамагнітними властивостями ( $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ). До того ж, вони вирізняються невисокою точністю і малою чутливістю. Теплові методи характерні безперервністю аналізу, необмеженістю діапазону вимірювань.

Разом з тим, ці методи мають значні недоліки, які затрудняють їх застосування у автоматичних системах контролю: велика інерційність, нелінійність градувальної характеристики, електрична залежність коефіцієнта

теплопровідності від оточуючих умов (коливання атмосферного тиску, швидкості газообміну, температури газового середовища, струму джерела живлення, вібрації та ін.). Дані методи також не забезпечують необхідної вибірковості і можуть бути використані лише при різкій відмінності теплопровідності визначуваного компонента від теплопровідності інших складників суміші. Отже, нижченаведені методи недоцільно використовувати у газовому аналізі при визначенні малих концентрацій.

**Пневматичний метод.** Газоаналізатори з дросельними перетворювачами вимірюють гідравлічний опір дроселя (капіляра) при пропусканні через нього газу. При постійній витраті газу перепад тиску на дроселі – функція густини (турбулентний дросель), в'язкості (ламінальний дросель) або того і іншого параметра одночасно.

Струменеві газоаналізатори використовують, наприклад, в азотній промисловості для вимірювання змісту  $N_2$  в азоті (діапазон вимірювання 0-50%), в хлорній промисловості для визначення  $Cl_2$  (0-50 і 50-100%). Час встановлення свідчень цих газоаналізаторів не перевищує декількох секунд, тому їх застосовують також в газосигналізаторах довзривних концентрацій газів і пари деяких речовин (наприклад, діхлоретана, вінілхлоріда) в повітрі промислових приміщень.

**Пневмоакустичний метод.** Пневмоакустичні газоаналізатори містять два свистки з близькими частотами (3-5 кГц), через один з яких проходить газ, який аналізується, через другий – порівняльний. Частота биття звукових коливань в змішувачі частот залежить від густини газу, що аналізується. Биття (частота до 120 Гц) посилюється і перетворюється в пневматичні коливання підсилювачем. Для отримання вихідного сигналу (тиск) служить частотно-аналоговий перетворювач.

Пневматичні газоаналізатори не володіють високою вибірковістю. Вони придатні для аналізу сумішей, в яких змінюється концентрація тільки одного з компонентів, а співвідношення між концентраціями інших залишається постійним, що є не придатним до застосування для контролю концентрації компонентів димових газів котельних установок. Діапазон вимірювання – від одиниць до десятків відсотків. Пневматичні газоаналізатори не містять електричних елементів і тому можуть використовуватися в приміщеннях будь-якої категорії пожежо- і вибухонебезпеки. Елементи схеми, що контактують з газами, виконані зі скла і фторопласту, що дозволяє аналізувати вельми агресивні гази (хлориди).

**Фізичні методи.** Термокондуктометричний метод. Принцип дії заснований на залежності теплопровідності газової суміші від її складу. Для більшості з них справедливе рівняння

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot C_i, \quad (1.1)$$

де  $\lambda$  – теплопровідність суміші;  $\lambda_i$  – теплопровідність і-того компонента;  $C_i$  – концентрація і-того компонента;  $n$  – число компонентів.

Термокондуктометричні газоаналізатори характеризуються невисокою

вибірковістю і використовуються, якщо компонент, який контролюється за теплопровідністю істотно відрізняється від інших, наприклад, для визначення концентрацій  $N_2$ ,  $Ar$ ,  $CO_2$  в газових сумішах, що містять  $N_2$ ,  $O_2$  та інші. Діапазон вимірювання – від одиниць до десятків відсотків за об'ємом.

Зміна складу газової суміші приводить до зміни її теплопровідності і, як наслідок, електричний опір металевого або напівпровідникового терморезистора, що нагрівається струмом, розміщеного в камері, через яку пропускається суміш. При цьому

$$\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} = \frac{\alpha}{a} \cdot I^2 \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right), \quad (1.2)$$

де  $\alpha$  – конструктивний параметр камери;  $R_1$  і  $R_2$  – опір терморезистора у разі пропускання через нього струму  $I$  при теплопровідності газового середовища.

Міра концентрації компоненту – електричний струм, який вимірюється вторинним приладом. Термокондуктометричні газоаналізатори широко застосовують для контролю процесів у виробництві ( $H_2SO_4$ ,  $NH_3$ ,  $HNO_3$ ). Недоліками термокондуктометричного методу є низька вибірковість та швидкодія. До того ж він має малий діапазон вимірювань.

Магнітний метод. Застосовують для визначення  $O_2$ . Принцип дії методу заснований на залежності магнітної сприйнятливості газової суміші від концентрації  $O_2$ , об'ємна магнітна сприйнятливості якого на два порядки більше, ніж у більшості інших газів. Такі газоаналізатори дозволяють вибірково визначати  $O_2$  в складних газових сумішах. Діапазон вимірюваних концентрацій 10 - 100%. Найбільш поширені магнітомеханічні і термомагнітні газоаналізатори.

У магнітомеханічних газоаналізаторах вимірюють сили, що діють в неоднорідному магнітному полі при поміщені в суміш, яка аналізується, тіла (зазвичай ротор). Сила  $F$ , що виштовхує тіло з магнітного поля, визначається виразом

$$F = (\chi - \chi_\tau) \int_0^V H \cdot \frac{dH}{d\chi} dV, \quad (1.3)$$

де  $\chi$  – об'ємна магнітна сприйнятливості, яка відповідає суміші, що аналізується і тіла, поміщеного в газ;  $V$  – об'єм тіла;  $H$  – напруженість магнітного поля.

Звичайно мірою концентрації компоненту служить обертаючий момент, що обраховується за кутом повороту ротора. Покази магнітомеханічного газоаналізатора визначаються магнітними властивостями аналізованої газової суміші і залежать від титри і тиску, оскільки останні впливають на об'ємну сприйнятливості газу.

Дія магнітотермічних газоаналізаторів заснована на термомагнітній конвекції газової суміші, що містить  $O_2$ , в неоднорідних магнітному і температурному полях.

Головним недоліком механічного методу (магнітомеханічного та магнітотермічного) є дуже низька швидкодія. Механічний метод не здатен забезпечити виску вибірковість вимірювання (особливо коли у суміші

міститься три і більше компонент).

**Термохімічний метод.** Сутність термохімічного методу газового аналізу зводиться до вибіркового поглинання того чи іншого компонента рідким, а іноді і твердим реагентом. В основу методу покладені хімічні реакції, при яких з даної газоподібної речовини і даної абсорбуючої речовини утворюється нова речовина, що практично не існує в газовій фазі. Складові частини газової суміші послідовно поглинаються різними поглиначами; кількість їх визначається по різниці об'ємів до і після абсорбції.

Цим методом визначають вміст наступних компонентів: двоокису вуглецю разом із сірководнем, двоокисом сірки й іншими кислими газами, ненасичені вуглеводні, а також вуглеводні гомологічного ряду бензолу, кисню, оксиду вуглецю, водню, насичених вуглеводнів, азоту разом з аргоном та іншими одноатомними газами. Кожний з цих газів може бути з достатньою точністю визначений при вмісті в досліджуваній газовій суміші не менше 0,05–0,1 % об., що складає близько 0,5 г/м<sup>3</sup>.

Зазначена вище чутливість методу не дозволяє віднести його до високочутливих і використовувати для розв'язання поставленої задачі. Недоліком є також те, що для кожного компонента складної газової системи застосовується особливий реагент, який специфічно діє на даний газ і який практично не діє на інші складові частини газової суміші. При досить складній суміші газів, які утворюються при горінні природного газу, підбір таких реагентів є дуже складною задачею.

**Фізико-хімічні методи.** Оптико-абсорбційного інфрачервоного методу. Дія заснована на вибіркового поглинанні молекулами газів і пари ІЧ-випромінювання в діапазоні 1-15 мкм. Це випромінювання поглинають всі гази, молекули яких складаються не менше ніж з двох різних атомів. Висока специфічність молекулярних спектрів поглинання різних газів обумовлює високу вибірковість таких газоаналізаторів та їх широке застосування в лабораторіях і промисловості. Діапазон вимірюваних концентрацій 0-100 %. У дисперсійних газоаналізаторах використовують випромінювання однієї довжини хвилі, одержане за допомогою монохроматорів (призми, дифракційної решітки).

У недисперсійних газоаналізаторах завдяки особливостям оптичної схеми приладу (застосуванню світлофільтрів, спеціальних приймачів) використовують немонохроматичне випромінювання.

Випромінювання від джерела послідовно проходить через світлофільтр і робочу кювету, в яку подається суміш, що аналізується, і потрапляє в спеціальний приймач. Якщо в суміші присутній компонент, який визначається, то залежно від концентрації він поглинає частину випромінювання, і реєстрований сигнал пропорційно змінюється. Джерелом випромінювання зазвичай служить нагріта спіраль з широким спектром випромінювання, ІЧ-лазер або світлодіод, випускаючи випромінювання у вузькій області спектру. Якщо використовується джерело немонохроматичного випромінювання вибірковість визначення досягається за допомогою селективного приймача.

Найбільш поширені газоаналізатори з газонаповненим оптико-акустичним приймачем. Останній є герметичною камерою з вікном, заповнену саме тим газом, концентрацію якого потрібно виміряти. Цей газ, поглинаючи з потоку випромінювання певну частину з характерним для даного газу набором спектральних ліній, нагрівається, внаслідок чого тиск в камері збільшується. За допомогою механічного модулятора потік випромінювання діє з певною частотою. В результаті з цією ж частотою пульсує тиск газу в приймачі. Амплітуда пульсації тиску – міра інтенсивності поглиненого газом випромінювання, залежна від того, яка частина характерного випромінювання поглинається тим самим газом в робочій кюветі. Інші компоненти суміші випромінювання на цих довжинах хвиль не поглинають. Амплітуда пульсації тиску в приймачі випромінювання – міра кількості компоненту який визначається в суміші, що проходить через робочу кювету. Зміну тиску вимірюють звичайно конденсаторним мікрофоном або датчиком витрати газу. Замінюючи газ в приймачі випромінювання оптико-акустичного газоаналізатора, можна вибірково вимірювати вміст різних компонентів сумішей.

У інфрачервоних газоаналізаторах використовують також неселективні приймачі випромінювання – болометри, термобатарей, напівпровідникові елементи. Тоді у разі джерел з широким спектром випромінювання вибірковість визначення забезпечують застосуванням інтерференційних і газових фільтрів. Для підвищення точності і стабільності частина, яка вимірюється потоку випромінювання, зазвичай пропускають через порівняльну кювету, заповнену газом, не поглинаючим реєстроване випромінювання, і вимірюють різницю або відношення сигналів, одержаних в результаті проходження випромінювання через робочу і порівняльну кювети.

Інфрачервоні газоаналізатори широко використовують для аналізу газів, що відходять у складі димових газів котельних установок. З їх допомогою визначають, наприклад,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$  в технологічних газах виробництва синтетичного аміаку, пари ряду розчинників в повітрі промислових приміщень, оксиди азоту,  $\text{SO}_2$  і вуглеводні у вихлопних газах автомобілів, димових газах котельних установок.

Недоліком інфрачервоного методу є нездатність визначати деякі одноатомні гази (такі як  $\text{O}_2$ ). Ця проблема усувається шляхом математично-аналітичних операцій. Іншим недоліком є накладання спектрів поглинання деяких газів. Ця проблема вирішується вибором довжин поглинання газів таким чином, щоб інші гази не потрапляли у цю зону.

Хемілюмінесцентний метод. У хемілюмінесцентних газоаналізаторах вимірюють інтенсивність люмінесценції, збудженої завдяки хімічній реакції контрольованого компоненту з реагентом в твердій, рідкій або газоподібній фазі. Суміш, яка аналізується, і реагент через дроселі поступають в реакційну камеру. Насос забезпечує необхідний тиск в камері. За наявності в суміші компоненту випромінювання, супроводжуюче хемілюмінесцентну реакцію, через світлофільтр подається на катод фотопомножувача, який розташований в

безпосередній близькості до реакційної камери. Електричний сигнал з фотопомножувача, пропорційний концентрації контрольованого компонента, після посилення поступає на вторинний прилад. При вимірюванні слабких світлових потоків, що виникають при малих концентраціях компонента, фотокатод охолоджують електричними мікрохолодильниками з метою зменшення фонового струму.

Для вимірювання концентрації  $\text{NO}_2$  в приладі передбачений конвертор, де  $\text{NO}_2$  перетворюється в  $\text{NO}$ , після чого суміш, яка аналізується, прямує в реакційну камеру. При цьому вихідний сигнал пропорційний сумарному вмісту  $\text{NO}$  і  $\text{NO}_2$ . Якщо ж суміш поступає, минувши конвертер, то по вихідному сигналу знаходять концентрацію тільки  $\text{NO}$ . По різниці цих сигналів судять про вміст  $\text{NO}_2$  в суміші.

Висока вибірковість хемілюмінесцентних газоаналізаторів обумовлена специфічністю вибраної реакції, проте супутні компоненти в суміші можуть змінювати чутливість приладу. Такі газоаналізатори застосовують для визначення  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{O}_3$  у повітрі в діапазоні 0-1%.

Принцип хемілюмінесцентного методу заснований на фотометруванні світлового потоку, який випромінюється в результаті хімічної взаємодії вимірювального компонента газової суміші з хемілюмінесцентними реагентами. Цей метод має високу чутливість та відрізняється відносною простотою. Він використовується для аналізу мікродошок озону  $\text{O}_3$ , оксидів азоту  $\text{NO}$  і  $\text{NO}_2$  та оксиду сірки  $\text{SO}_2$  в атмосферному повітрі [9].

Прилади на основі хемілюмінесцентного методу мають високу швидкодію (30–50 с) [13]. Межі виявлення аналізованих компонентів наступні: для  $\text{SO}_2$  –  $8,5 \cdot 10^{-4}$  мг/м<sup>3</sup>; для  $\text{O}_3$  –  $3,1 \cdot 10^{-3}$  мг/м<sup>3</sup>; для  $\text{NO}$  і  $\text{NO}_2$  –  $1,4 \cdot 10^{-2}$  мг/м<sup>3</sup>.

Цей метод є досить чутливим. Однак головним його недоліком є невисока селективність (вибірковість), оскільки спектри люмінесценції зазвичай являють собою широкі смуги і часто перекриваються. І лише деякі речовини володіють досить характерними спектрами люмінесценції.

Флуоресцентний метод. Флуоресцентні газоаналізатори вимірюють інтенсивність флуоресценції (довжина хвилі), що виникає при дії на контрольований компонент УФ - випромінювання. Суміш, що аналізується поступає в детекторну камеру, яка відокремлена від імпульсного джерела УФ - випромінювання і від фотопомножувача світлофільтрами, що пропускають випромінювання з довжинами хвиль відповідними імпульсам. Фотопомножувач, розташований під кутом  $90^\circ$  до джерела випромінювання, реєструє імпульси флуоресценції, амплітуда яких пропорційна концентрації компонента в камері. Електричний сигнал з фотопомножувача після посилення і обробки поступає на вторинний прилад. Газоаналізатори для визначення  $\text{SO}_2$  характеризуються високою чутливістю і вибірковістю. Вони використовуються в автоматичних станціях контролю навколишнього середовища. Головним недоліком флуоресцентного методу є низька надійність. За рахунок складної структури засобів які його використовують.

Фотоколориметричний метод. Ці прилади вимірюють інтенсивність

забарвлення продуктів виборчої реакції між компонентом, що визначається, і спеціально підібраним реагентом. Реакцію здійснюють, як правило, в розчині (рідинні газоаналізатори) або на твердому носії у вигляді стрічки, пігулки, порошку (відповідно стрічкові, пігулкові, порошкові газоаналізатори).

Випромінювання від джерела проходить через робочу і порівняльну кювети та поступає на відповідні приймачі випромінювання. Індикаторний розчин протікає з постійною швидкістю через обидві кювети і абсорбер. Назустріч потоку розчину через абсорбер проходить газ, що аналізується. Компонент, який визначається, взаємодіє з реагентом в розчині, викликаючи зміну оптичної густини в робочій кюветі, пропорційне концентрації компоненту. В результаті інтенсивність випромінювання через одну з кювет змінюється, а через іншу – ні. Різниця (або відношення) сигналів робочого і порівняльного каналів – міра концентрації компоненту в аналізованій суміші.

Подача розчину може бути як безперервною, так і періодичною. При періодичній подачі газ пропускають протягом деякого часу через одну і ту саму порцію розчину, що дозволяє підвищити чутливість визначення. Такі газоаналізатори дають можливість виміряти середню концентрацію компонента за заданий проміжок часу, наприклад, при встановленні середньодобових концентрацій токсичних домішок в повітрі. Хоча цей метод і має високу чутливість, але при цьому він володіє низькою вибірковістю та швидкодію, за рахунок особливостей самого процесу вимірювання.

Амперметричний метод. Дія амперметричних газоаналізаторів заснована на залежності між електричним струмом і кількістю компоненту, який визначається, що прореагував на індикаторному електроді. Якщо контрольований компонент повністю вступає в електрохімічну реакцію, то виконується закон Фарадея

$$I = n \cdot F \cdot Q \cdot C_i, \quad (1.4)$$

де  $I$  – струм;  $Q$  – витрата газу;  $C$  – концентрація  $i$ -го компонента;  $F$  – число Фарадея;  $n$  – число електронів, що беруть участь в реакції.

Електрохімічне перетворення даного компоненту газової суміші з 100% - вим виходом по струму (тобто відсутність побічних електродних реакцій) забезпечується вибором індикаторного електроду і його потенціалу. Необхідне постійне значення різниці потенціалів підтримується завдяки тому, що порівняльний і індикаторний електроди виконують з двох різних спеціально підібраних металів, наприклад з Zn, Au і Pb, Ni і Cd (осередки гальванічного типу). Різницю потенціалів можна стабілізувати і за допомогою електронної системи з використанням третього допоміжного електроду (осередки потенціостатичного типу).

Амперметричні газоаналізатори застосовують для визначення газів, що володіють окислювально - відновлювальними властивостями ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{O}_2$ ). Перевага амперметричного газоаналізатора - висока чутливість і вибірковість. Недоліками такого методу є невеликий діапазон вимірювання, не висока швидкодія та вибірковість.

Іонізаційний метод. Їх дія заснована на залежності електричної

провідності іонізованих газів від їх складу. Поява в газі домішок приводить до додаткової дії на процес утворення іонів або на їх рухливість і, отже, рекомбінацію. Виникаюча при цьому зміна провідності пропорційна вмісту домішок.

Всі іонізаційні газоаналізатори містять проточну іонізаційну камеру, на електроди якої накладають певну різницю потенціалів. Ці прилади широко застосовують для контролю мікродомішок в повітрі, а також як детектори в газових хроматографах. Розглянемо найбільш поширені типи іонізаційні газоаналізатори, що використовуються без попереднього хроматографічного розділення проби.

До радіоізотопних газоаналізаторів, в яких іонізацію газів здійснюють радіоактивним випромінюванням, відносяться прилади на основі перетину іонізації, електроннозахватні і аерозольно-іонізаційні. По-перше, використовують різницю в перетинах іонізації компонентів суміші. Іонізацію здійснюють зазвичай випромінюванням  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{147}\text{Pm}$ . Ці газоаналізатори не вибіркові, їх застосовують для аналізу сумішей  $\text{H}_2\text{-N}_2$ ,  $\text{N}_2\text{-CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  - етилен,  $\text{H}_2\text{-CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{-CH}_3\text{SiCl}_3$ ,  $\text{H}_2\text{-BCl}_3$ ; діапазон вимірювання 0,01-100%; час встановлення показань - до 0,1 с.

Полум'яно-іонізаційний метод. У полум'яно-іонізаційних газоаналізаторах органічні сполуки, які аналізуються, іонізують у водневому полум'ї. Ефективність іонізації пропорційна числу атомів С, що поступають в полум'я за одиницю часу, але залежить також від наявності в молекулі речовини атомів інших елементів. Пальник служить одним з електродів іонізаційної камери. Другий електрод ("колекторний") - тонкостінний циліндр або кільце. Ці газоаналізатори використовують для визначення органічних речовин в повітрі і технологічних газах ( $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ). При сумісній присутності ряду органічних компонентів знаходять або їх суму, або концентрацію компонентів із значно більшою ефективністю іонізації. За допомогою полум'яно-іонізаційних газоаналізаторів контролюють зміну сумарного вмісту вуглеводнів в атмосфері і токсичні домішки в повітрі промислових приміщень, чистоту вихлопних газів автомобілів, виток газів з трубопроводів і підземних комунікацій. Діапазон вимірюваних концентрацій 0,5-1%. Існує безпосередній взаємозв'язок між ефективністю іонізації органічних газів і пари та ступенем вибухонебезпеки їх сумішей з повітрям. Це дозволяє контролювати вибухові концентрації органічних речовин в промислових приміщеннях, шахтах, тунелях.

Головним недоліком полум'яно-іонізаційного методу є неможливість визначати неорганічні речовини (такі як  $\text{CO}$  та  $\text{CO}_2$ ). Також недоліками даного методу є невисока вибірковість при аналізі багатоконпонентних сумішей.

Основні переваги та недоліки методів контролю концентрації компонентів димових газів котельних установок представлено у таблиці 1.3. При аналізі методів використовувались джерела [3] .



Таблиця 1.3

## Порівняння методів контролю концентрації компонентів димових газів

Назва методу	Фізична природа методу	Основні переваги методу	Основні недоліки методу
<b>Термокондуктометричний</b>	Принцип дії заснований на залежності теплопровідності газової суміші від її складу	Широко застосовують для контролю процесів у виробництві	Неселективний. До того ж малий діапазон вимірювань
<b>Термохімічний</b>	Сутність зводиться до вибіркового поглинання того чи іншого компонента рідким, а іноді і твердим реагентом	Визначають вміст двоокису вуглецю разом із сірководнем. Кожний з цих газів може бути з достатньою точністю визначений при вмісті в досліджуваній газової суміші не менше 0,05–0,1 % об.	Для кожного компонента складної газової системи застосовується особливий реагент, який специфічно діє на газ, який аналізується
<b>Магнітний</b>	Принцип дії методу заснований на залежності магнітної сприйнятливості газової суміші від концентрації $O_2$	Застосовують для визначення $O_2$	Низька швидкодія
<b>Пневматичний</b>	Вимірюють гідравлічного опору дроселя (капіляра) при пропусканні через нього газу	Елементи схеми, що контактують з газами, виконані зі скла і фторопласту, що дозволяє аналізувати агресивні гази	Не володіє високою вибірковістю
<b>Пневмоакустичний</b>	Містять два свистки з близькими частотами (3-5 кГц), через один з яких проходить газ, який аналізується, через другий – порівняльний	Не містять електричних елементів і тому можуть використовуватися в приміщеннях будь-якої категорії пожежо і вибухонебезпеки	Діапазон вимірювання – від одиниць до десятків відсотків
<b>Оптикоабсорбційний інфра-</b>	Дія заснована на виборчому поглинанні молекулами газів і пари $HC$ -	Широко використовують для контролю якості продукції, аналізу	Недоліком є нездатність визначати деякі одноатомні гази

<b>червоний</b>	випромінювання в діапазоні 1-15 мкм	газів, що відходять у складі димових газів котельних установок.	(такі як O <sub>2</sub> )
<b>Хемілю-мінесцентний</b>	Вимірюють інтенсивність люмінесценції, збудженої завдяки хімічній реакції контрольованого компонента з реагентом в твердій, рідкій або газоподібній фазі	Висока вибірковість обумовлена специфічністю вибраної реакції	Недоліком є невисока селективність оскільки спектри люмінесценції зазвичай являють собою широкі смуги і часто перекриваються.
<b>Флуоресцентний</b>	Вимірюють інтенсивність флуоресценції (довжина хвилі), що виникає при дії на контрольований компонент УФ – випромінювання	При визначенні SO <sub>2</sub> характеризуються високою чутливістю і вибірковістю	Недоліком методу є низька надійність. За рахунок складної структури засобів
<b>Фотоколориметричний</b>	Вимірюють інтенсивність забарвлення продуктів виборчої реакції між компонентом, що визначається, і спеціально підібраним реагентом	Дозволяє контролювати вибухові концентрації органічних речовин	Хоча цей метод і має високу чутливість, але при цьому він володіє низькою вибірковістю та швидкістю, за рахунок особливостей самого процесу вимірювання
<b>Амперометричний</b>	Дія заснована на залежності між електричним струмом і кількістю компонента, який визначається, що	Перевага амперметричного газоаналізатора - висока чутливість і вибірковість	Недоліками такого методу є невеликий діапазон вимірювання, не висока

	прореагував на індикаторному електроді		швидкодія та вибірковість
<b>Іонізаційний</b>	Дія заснована на залежності електричної провідності іонізованих газів від їх складу	Здатність контролю зміни сумарного вмісту вуглеводнів в атмосфері і токсичні домішки в повітрі промислових приміщень, чистоту вихлопних газів автомобілів, витоку газів з трубопроводів і підземних комунікацій	Головним недоліком є неможливість визначати неорганічні речовини (такі як СО та СО <sub>2</sub> ), а також низька вибірковість при аналізі багатоконпонентних сумішей

### 1.3 Вибір методу контролю концентрації компонентів димових газів котельних установок

Для оцінення якості та порівняння різних методів та засобів вимірювання (ЗВ) істотне значення має вибір критерію оцінення їх ефективності. Вибір конкретних критеріїв ефективності залежить від призначення засобу вимірювання та вимог, які до нього висуваються. Відпрацьовані загальні рекомендації, які доцільно враховувати при виборі критеріїв ефективності [11,12].

Критерій повинен:

- відображати головне призначення засобу контролю;
- бути критичним по відношенню до параметрів, які дозволяють його змінювати;
- володіти конструктивністю, яка дозволяє відносно просто визначити його чисельне значення;
- бути достатньо універсальним, дозволяти порівнювати ефективність систем одного призначення і обрати кращий варіант.

В теорії інформаційно-вимірювальних систем використовуються різні характеристики точності, швидкодії, надійності та вартості, кожні з яких можуть використовуватися як окремі показники якості засобу контролю. Окремі показники характеризують засіб контролю під тим чи іншим кутом зору і не дають достатньо повного уявлення про його ефективність в цілому. Це вказує на необхідність використання узагальнених критеріїв ефективності. Найбільш простим і зручним для аналізу і вибору базового методу контролю для розробки засобу вимірювання є УЯКЕ.

УЯКЕ вказує на досягнення мети (ефекту), яка поставлена перед засобом контролю. Цей критерій можна розуміти як приймаючий тільки два значення:

“1” – якщо мета досягнута, “0” – в протилежному випадку. Тоді якісний критерій ефективності буде являти собою суму часткових якісних критеріїв ефективності, що характеризують часткові цілі, поставлені перед засобом контролю

$$k = \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{n}, \quad (1.5)$$

де  $a_i$  – вагові коефіцієнти;  $n$  – загальна кількість якісних критеріїв ефективності.

Загальна ефективність визначається відношенням ефективності засобу вимірювання на базі реального методу контролю концентрації компонентів димових газів і засобу вимірювання на базі потенційного методу контролю

$$E_i = \frac{k_i}{k_{opt}}, \quad (1.6)$$

де  $k_i$  – узагальнений якісний критерій  $i$ -ого методу;  $k_{opt}$  – потенційний (зразковий) метод контролю.

Для досягнення будь-якої окремої мети засіб контролю повинен реалізовувати всі свої потенційні можливості в рамках методу контролю, що ним використовується. Це дозволяє проводити порівняльний аналіз засобів вимірювання на рівні методів контролю, що ним використовується. При цьому не виникає необхідності встановлювати зв'язок між УЯКЕ і параметрами засобу вимірювання, конкретні значення або інтервал вимірювання яких визначав би чисельне значення УЯКЕ. Порівняння методів для контролю концентрації компонентів димового газу представлено у таблиці 1.4. Вагові коефіцієнти у таблиці 1.4. занесено при аналізі огляду 1.2 (“1” – відповідає висунутим вимогам, “0” – не відповідає).

Таблиця 1.4

Порівняння методів для контролю концентрації компонентів димового газу

Метод/ Параметр	Діапазон вимірювань	Швидкість	Надійність	Багато- компонентність	Вибірковість	УЯКЕ
Термокондуктометричний	0.2	0.2	0.9	0.9	0.1	0.46
Термохімічний	0.3	0.2	0.8	0.8	0.3	0.48
Магнітний	0.4	0.4	0.9	0.9	0.9	0.7
Пневматичний	0.1	0.1	0.7	0.7	0.2	0.36
Пневмоакустичний	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.16
Оптико-абсорбційний інфрачервоний	1	0.9	0.8	0.9	0.8	0.88
Хемілюмінесцентний	0.9	0.8	0.3	0.9	0.8	0.74
Флуоресцентний	0.9	0.8	0.3	0.9	0.8	0.74
Фотоколориметричний	0.8	0.8	0.2	0.8	0.8	0.68
Амперометричний	0.2	0.2	0.7	0.7	0.3	0.42

Іонізаційний	0.2	0.9	0.3	0.8	0.4	0.52
--------------	-----	-----	-----	-----	-----	------

Порівняльний аналіз розглянутих вище методів контролю і засобів вимірювання концентрації компонентів димових газів на базі (1.5) - (1.7) показує, що найбільш перспективним є оптико-абсорбційний інфрачервоний метод вимірювання.

#### 1.4 Математичне представлення оптико-абсорбційного інфрачервоного методу

Враховуючи те, що оптико-абсорбційний інфрачервоний метод виявився більш придатним для вимірювального контролю концентрації компонентів димових газів, є необхідність розглянути його більш детально для подальшої роботи.

У ІЧ діапазоні спектру є специфічні особливості реєстрації поглинання газу, який аналізується завдяки наявності коливально-обертальних смуг поглинання. Величина потоку випромінювання, що пройшов через вимірювальну кювету з газом, що аналізується, може бути визначена за законом Бугера-Ламберта-Бера [159]

$$\Phi_{\lambda}(\lambda) = \Phi_{\lambda_0}(\lambda) \cdot e^{-\chi(\lambda) \cdot C_i \cdot l}, \quad (1.8)$$

де  $\Phi_{\lambda}(\lambda), \Phi_{\lambda_0}(\lambda)$  - спектральна густина потоку випромінювання на даній довжині хвилі;  $\chi(\lambda)$  - масовий показник поглинання речовини для даної довжини хвилі  $\lambda$ ;  $C_i$  - концентрація речовини, що поглинає оптичне випромінювання;  $l$  - товщина шару середовища яке поглинає випромінювання.

Використовують відоме значення  $\chi$  газу, що аналізується для довжини хвилі джерела, або, якщо ширина смуги джерела порівнянна з шириною смуги поглинання газу, усереднене за спектром випромінювання джерела ефективне значення коефіцієнта поглинання  $\chi_e$ . При цьому враховується інтегральний за спектром джерела потік випромінювання, який якраз і реєструється фотоприймачами. Тоді закон Бугера-Ламберта-Бера виражається [3]

$$\Phi = \Phi_0 \cdot e^{-\chi_e \cdot C_i \cdot l}, \quad (1.9)$$

де  $\chi$  і  $l$  відомі, а вимірюється відношення минулого через шар  $l$  газу потоку до вхідного потоку  $\Phi/\Phi_0$  або їх різниця при слабкому поглинанні.

Для ІЧ діапазону характерні вузькі смуги поглинання газів і порівняно широкі спектральні смуги джерел зондуючого випромінювання. Розглянемо, як це позначається на залежності інтенсивності випромінювання, що пройшло через газ від вмісту газу що вимірюється. Фотоприймач реагує на інтегральний минувший через газ потік випромінювання

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda}(\lambda) d\lambda, \quad (1.10)$$

де  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  - межі спектру випромінювання джерела.

Тоді шари товщиною  $l$  розглянемо як результат інтегрування за довжиною хвилі

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda_0}(\lambda) \cdot e^{-\chi(\lambda) \cdot C_i \cdot l} d\lambda. \quad (1.11)$$

У цьому виразі не вдається виділити параметр  $\varphi$ , тобто представити функцію у вигляді

$$\Phi = \Phi_0 \cdot F_1(C_i) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_2[\chi(\lambda)] d\lambda, \quad (1.12)$$

де  $F_1(C_i)$ ,  $F_2[\chi(\lambda)]$  – функції з розділеними змінними, і тому залежність

$$\ln \frac{\Phi}{\Phi_0} = -\chi(\lambda) \cdot C_i \cdot l, \quad (1.13)$$

не виконується, особливо у разі сильного поглинання. Відзначимо, що тут недоречно говорити про порушення закону Бугера-Ламберта-Бера, тому що його використання обмежено випадком монохроматичного випромінювання або випадками, коли немонохроматичністю можна нехтувати, як це було розглянуто вище.

Для слабкого поглинання закон Бугера-Ламберта-Бера може бути представлений у вигляді

$$\Delta \Phi_{\lambda}(\lambda) = -\Phi_{\lambda_0}(\lambda) \cdot \chi(\lambda) \cdot C_i \cdot l \quad (1.14)$$

або

$$\Delta \Phi_{\lambda}(\lambda) - \Phi_{\lambda_0}(\lambda) = -\Phi_{\lambda_0}(\lambda) \cdot \chi(\lambda) \cdot C_i \cdot l. \quad (1.15)$$

Проінтегрувавши (1.15) по інтервалу довжин хвиль, отримаємо

$$\Phi - \Phi_0 = - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda_0}(\lambda) \cdot \chi(\lambda) \cdot C_i \cdot l d\lambda \quad (1.16)$$

або

$$\Phi - \Phi_0 = -C_i \cdot l \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda_0}(\lambda) \cdot \chi(\lambda) d\lambda, \quad (1.17)$$

тобто спостерігається лінійна залежність різниці випромінювань, що пройшли через газ, який аналізується і потоків які входять від об'ємної частки речовини незалежно від форми смуг випромінювання джерела і смуги поглинання газу, що визначається. Тут функція  $\chi(\lambda)$  може бути замінена її ефективним значенням  $\chi_e$ , і тоді вираз (1.16) приймає вигляд

$$\Phi - \Phi_0 = -\rho \cdot l \cdot \chi_e \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda_0}(\lambda) d\lambda = \Phi_0 \cdot \chi_e \cdot \rho \cdot l, \quad (1.18)$$

або, якщо вимірюється відношення  $\Phi/\Phi_0$

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = 1 - \chi_e \cdot \rho \cdot l. \quad (1.19)$$

Для того, щоб визначити значення величини  $\chi_e$ , вимірюють  $\Phi/\Phi_0$  для газу з відомою концентрацією  $C_i$ , або  $(\Phi - \Phi_0)$  для відомої  $C_i$  і фіксованому значенні  $\Phi_0$ , або відповідні цим величинам вихідні сигнали приладу. В загалом випадку, коли поглинання не можна вважати слабким, тобто співвідношення (1.13) не виконується, будують градувальні криві, вимірюючи електричний

сигнал на виході приладу для ряду еталонних газових сумішей з відомим вмістом газу який визначається.

Величина різницевого сигналу при слабкому поглинанні у відповідності з виразом (1.18) виявляється пропорційній об'ємній частці  $\Phi_0$  газу що вимірюється. Розглянемо, яка залежність цього сигналу від об'ємної частки при величині поглинання, достатньої, щоб співвідношення (1.13) не виконувалося. Віднімемо з правої і лівої частин рівняння (1.8)  $\Phi_{\lambda_0}$  і змінимо знак в обох його частинах

$$\Phi_{\lambda_0}(\lambda) - \Phi_{\lambda}(\lambda) = \Phi_{\lambda_0} \cdot [1 - e^{-\chi(\lambda) \cdot C_i \cdot l}]. \quad (1.20)$$

Проінтегрувавши цей вираз по інтервалу довжин хвиль, одержимо

$$\Phi_0 - \Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda_0}(\lambda) \cdot [1 - e^{-\chi(\lambda) \cdot \rho \cdot l}] d\lambda. \quad (1.21)$$

Інтервал довжин хвиль може бути обмежений ділянкою, де  $\chi(\lambda)$  помітно відрізняється від нуля. При достатньо вузькій лінії поглинання в порівнянні із смугою зондуючого оптичного випромінювання,  $\Phi_{\lambda_0}$  на цьому інтервалі довжин хвиль змінюється слабо і, відповідно до теореми середнім, можна винести  $\Phi_{\lambda_0}$  за знак інтегрування, замінивши її на деяке середнє ефективне значення  $\Phi_{\lambda_{0e}}$ . За тих же умов і не дуже сильним поглинанням  $\chi(\lambda)$  також може бути замінена на  $\chi_e$ , а функція  $\exp(-\chi_e \cdot \rho \cdot l)$  винесена за знак інтеграла. Тоді

$$\Phi_0 - \Phi = \Phi_e \cdot [1 - \exp(-\chi_e \cdot \rho \cdot l)], \quad (1.22)$$

де  $\Phi_e = \Phi_{\lambda_{0e}}(\lambda_2 - \lambda_1)$ .

При дуже сильному поглинанні, коли спектр пройшов через кювету з газом ГЧ випромінювання, у виразі (1.22) величини  $\Phi_{\lambda_{0e}}$  і  $\chi_e$  вже не можна вважати постійними параметрами, оскільки вони змінюють своє значення.

Приведене вище являє собою процес переходу від ідеальної умови монохроматичності оптичного випромінювання, для якого сформульований закон Бугера-Ламберта-Бера, до реального положення, вельми далекого від ідеалу. Проте, визначений вид залежності і умови, при яких справедливі зроблені допущення. Пряме вирішення задачі вимагало б точне значення функцій  $\Phi_{\lambda_0}(\lambda)$  і  $\chi(\lambda)$ , що привело б до громіздких виразів, які можуть бути розраховані лише чисельними методами інтегрування і позбавлені наочності. Кінцевий результат мав би меншу цінність, оскільки придатний тільки для абсолютно конкретних  $\Phi_{\lambda_0}(\lambda)$  і  $\chi(\lambda)$ .

Прийнявши, що перетворення потоків випромінювання у всьому тракті від фотоприймача до індикатора лінійне, замість виразу (1.18) можна написати

$$\Phi_{\text{вих}} = \Delta\Phi = \Phi_e \cdot [1 - \exp(-k \cdot C_i)], \quad (1.23)$$

де  $k$  – коефіцієнт поглинання світла.

З (1.22) і (1.23) видно що величин  $\Delta\Phi$  і  $\Phi_e$  залежать від  $\Phi_0$ , тобто необхідно високостабільне джерело оптичного випромінювання. В цьому випадку рівняння (1.23) можна представити у вигляді

$$I_{вих} = I_0 \cdot [1 - \exp(-k \cdot C_i)], \quad (1.24)$$

де  $I_{вих}$  – інтенсивність падаючого світла;  $I_0$  – інтенсивність пройденого світла,  $k$  – коефіцієнт поглинання світла;  $C_i$  – концентрація компонента, яка залежить від кількості речовини у пробі.

Величина потоку випромінювання, що пройшов через вимірювальну кювету з газом, який аналізується, може бути визначена за законом Бугера-Ламберта-Бера (1.24). Для перевірки відповідності градуовальної кривої, продиференціюємо вираз (1.24)

$$\frac{dI_{вих}}{d\varphi} = I_0 \cdot b \cdot \exp(-b \cdot C_i), \quad (1.25)$$

і одержаний вираз прологарифмуємо

$$\ln\left(\frac{dI_{вих}}{d\varphi}\right) = \ln(I_0 \cdot b) - b \cdot C_i \quad (1.26)$$

або

$$y = c - b \cdot C_i, \quad (1.27)$$

де  $y = \ln\left(\frac{dI_{вих}}{dC_i}\right)$ ,  $c = \ln(I_0 \cdot b)$ .

Теоретично отриману залежність 1.24 та прийmemo для аналізу адекватності розробленої (у 2 розділі) емпіричної математичної моделі для визначення концентрації димових газів на основі оптико-абсорбційного методу.

## **1.5 Аналіз схем оптико-абсорбційних засобів контролю концентрації компонентів димових газів котельних установок**

Для аналізу схем оптичних засобів контролю концентрації компонентів димових газів котельних установок, було здійснено огляд патентів та джерел [3, 11, 75, 76, 78, 84, 85, 87, 90, 134, 164]. Огляд було проведено серед схем, дія яких ґрунтується на оптичних методах інфрачервоної абсорбційної спектроскопії, оскільки саме цей метод покладений в основу розробленого засобу контролю концентрації компонентів димових газів котельних установок.

Аналіз показав, що існує багато розроблених та запатентованих засобів контролю складу димових газів котельних установок. Проте більшість із них використовують дві кювети (робочу та з “нульовим” газом), але такий тип схем оптичних засобів технічно застарів. Це пояснюється складністю конструкції засобів контролю і їх не високою точністю. До того ж всі вони використовують єдине джерело випромінювання та фільтри, але такий підхід значно зменшує швидкодію засобу (за рахунок того що проба проходить довший шлях у оптичному тракті).

Усі проаналізовані засоби контролю не передбачають використання інших вимірювальних каналів для оцінки та компенсації впливних факторів. Через це вимірювання за допомогою цих засобів не матимуть необхідної точності. Тому доцільно передбачити у розроблюваному засобі контролю



концентрації компонентів димових газів котельних установок додаткові вимірювальні канали.

На рис. 1.5 представлено схему двопроменевого фотометра з двома фотоприймачами.

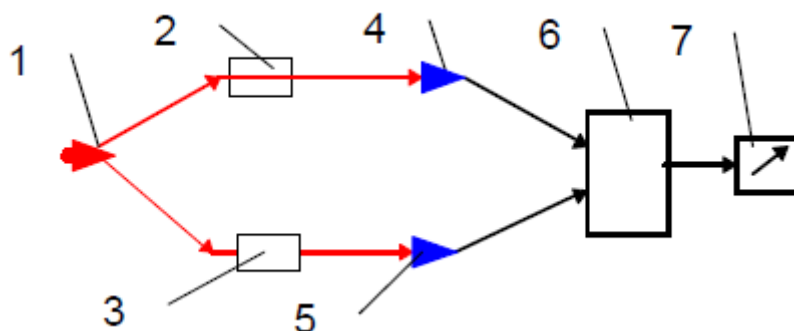


Рис. 1.5. Схема двопроменевого фотометра з двома фотоприймачами: 1 - джерело, 2 - робоча кювета, 3 - кювета з "нульовим" газом, 4, 5 - приймачі оптичного випромінювання, 6 - диференційний підсилювач-перетворювач, 7 - реєстратор.

У двопромених фотометрах оптичне випромінювання від джерела 1 розділяється на два однакових пучка. Один з них проходить через кювету 2 з газом, що вимірюється, а інший – через таку ж кювету 3, заповнену "нульовим" газом, що не містить вимірюваної складової. Потім кожен пучок оптичного випромінювання направляється в окремі фотоприймачі 4 і 5, сигнали від яких надходять на диференційний підсилювач 6.

У разі слабкого поглинання світла у вимірювальній кюветі різниця фотострумів обох фотоприймачів є пропорційною масовій концентрації речовини, а для сильного поглинання пропорційним концентрації буде логарифм відносини сигналів від фотоприймачів. Для того, щоб на індикаторі 7 приладу мати безпосереднє значення концентрації газу, який визначається, сигнали від обох каналів повинні оброблятися відповідним чином.

У двопромених схемах оптичне випромінювання може піддаватися модуляції по інтенсивності модулятором 5 (рис. 1.6) в протифазі один до одного, і тоді обидва потоки направляються на один приймач оптичного випромінювання 4, а потім на підсилювач-перетворювач 6.

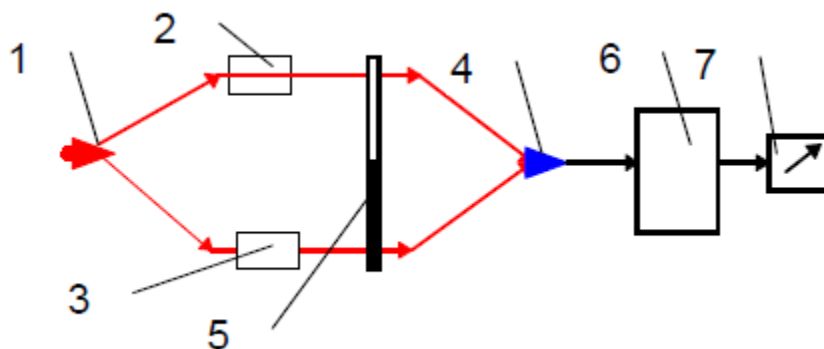


Рис. 1.6. Схема двопроменевого фотометра з модулятором:

- 1 - джерело випромінювання; 2 - робоча кювета; 3 - кювета з "нульовим" газом;  
 4 - приймач оптичного випромінювання; 5 - модулятор;  
 6 - підсилювач-перетворювач; 7 - реєстратор.

У разі слабого поглинання випромінювання для модульованих пучків амплітуда змінної складової фотоструму приймача буде пропорційною концентрації. Для сильного поглинання концентрації пропорційний логарифм відношення максимального та мінімального рівня сигналу від фотоприймача за період модуляції. Для слабого поглинання, як правило, можна знехтувати нелінійною залежністю фототока приймача від падаючого на нього потоку, тому що в цьому випадку корисна складова сигналу складе лише малу частку від фону. Необхідно щоб фотоприймач і первинний підсилювач не перебували в режимі насичення. Вимога до ідентичності характеристик обох фотоприймачів є не надто жорсткою, і "розкид" їх чутливості може бути компенсований зміною параметрів електричних ланцюгів (наприклад, ослабленням сигналу від одного з фотоприймачів за допомогою дільника напруги) або оптичним методом - діафрагмуванням одного з пучків.

Можна помітити, що сигнал від фотоприймача, що сприймає потік випромінювання, який пройшов через кювету з "нульовим" газом, залежить тільки від потоку випромінювання джерела і при незмінному потоці випромінювання залишається постійним. Тоді весь канал порівняння фотометра може бути замінений джерелом постійної напруги або струму, відповідного за величиною сигналу від фотоприймача, коли вимірювальна кювета заповнена "нульовим" газом. Це значно спрощує конструкцію приладу і здешевлює його. Такий фотометр стає однопроменевим. На рис. 1.7 представлено схему ХЛ ЗВ.

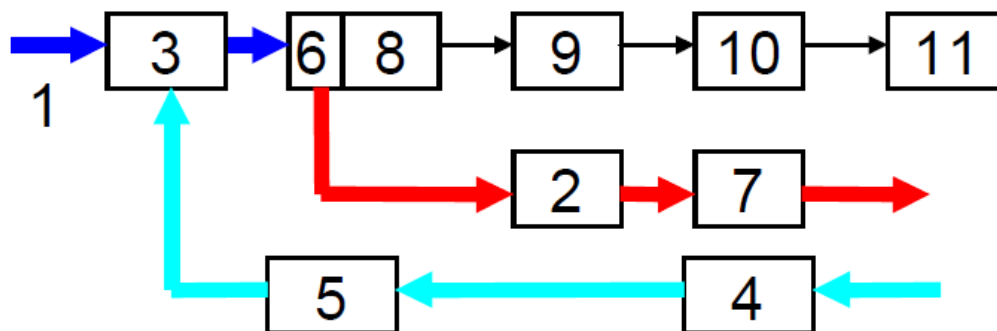


Рис. 1.7. Структурна схема ХЛ ЗВ:

- 1 - забірний патрубок; 2 - ротаметр; 3 - газовий комутатор; 4 - фільтр-поглинач;  
 5 - калібратор; 6 - ХЛ-реактор; 7 - насос; 8 - приймач оптичного  
 випромінювання; 9 - підсилювач; 10 - процесор; 11 - індикатор.

Газ, який аналізується, надходить в забірний патрубок засобу і через комутатор потрапляє в ХЛ реактор 6. Випромінювання хемілюесценції за допомогою приймача оптичного випромінювання 8 перетворюється в електричний сигнал, посилюється в підсилювачі 9, перетворюється в цифровий код, піддається функціональній обробці в процесорі 10 і результат висвічується

на табло індикатора 11. Для коригування зміни чутливості ХЛ датчика служить вбудований генератор стандартної масової концентрації вимірюваного газу (калібратор) 5. Блок 10 при подачі газу від калібратора встановлює такі параметри перетворення електричного сигналу від приймача оптичного випромінювання, щоб показання індикатора відповідали концентрації, що визначається. Тоді при вимірюванні невідомої концентрації індикатор буде показувати значення безпосередньо в одиницях масової концентрації. На рис. 1.8 представлено схему ІЧ ЗВ.

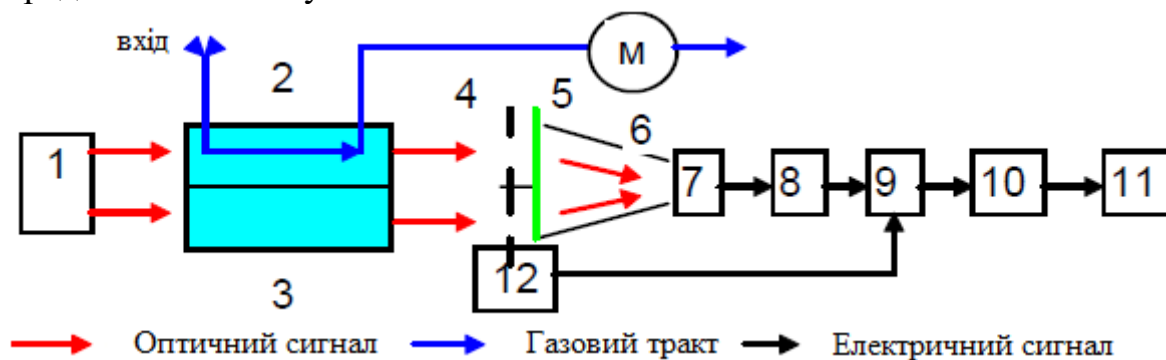


Рис. 1.8. Структурна схема ІЧ ЗВ

ІЧ випромінювання від джерела 1 надходить в дві розташовані поруч і паралельно одна до одної кювети 2 і 3. Далі пучки оптичного випромінювання піддаються модуляції в протифазі одна до одної за допомогою обтюратора 4, що представляє собою обертовий диск з прорізами. Потім оптичне випромінювання проходить через інтерференційний світлофільтр 5, що має максимальне пропускання (як приклад  $\tau = 80\%$  на  $\lambda = 4,2$  мкм). У цю смугу потрапляє лінія поглинання двоокису вуглецю. Далі обидва модульованих пучка за допомогою концентратора 6 спрямовуються на піроелектричний фотоприймач 7. У фотоприймачі здійснюється перетворення потоку випромінювання в пропорційний йому за величиною змінний електричний сигнал і відбувається його попереднє посилення. Потім сигнал посилюється в основному підсилювачі 8 і розділяється на складові, що відповідають потокам випромінювання через кювети 2 і 3 в синхронному детекторі 9. Робота детектора синхронізується з обертанням обтюратора за допомогою фотодатчика 12. Далі сигнали надходять в блок обробки 10, де вони віднімаються і сигнал результату відображається на індикаторі 11.

## 1.6 Огляд сучасних засобів визначення концентрації компонентів димових газів котельних установок

Засоби вимірювання, призначені для кількісного визначення концентрації компонентів газу, називаються газоаналізаторами і газовими хроматографами [75]. Ці технічні засоби залежно від їх призначення підрозділяються на переносні і стаціонарні. Переносні газоаналізатори і хроматографи застосовуються для кількісного визначення концентрації компонентів газу при виконанні дослідних робіт у лабораторних умовах, а також при спеціальних

обстеженнях, випробуваннях і налагодженні різних промислових теплотехнічних установок. Стаціонарні газоаналізатори призначені для безперервного автоматичного вимірювання об'ємного процентного вмісту компонента в газовій суміші. Стаціонарні газоаналізатори широко застосовуються для контролю процесу горіння в топкових пристроях парогенераторів, печей та інших агрегатів для аналізу технологічних газових сумішей тощо.

Найбільш поширеним методом для визначення складу газоподібного палива і продуктів неповного згоряння є газова хроматографія [149]. Сучасні хроматографи дозволяють з високою точністю протягом кількох хвилин визначити склад продуктів неповного згоряння:  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ . Загальна схема хроматографа представлена на рис. 1.9.

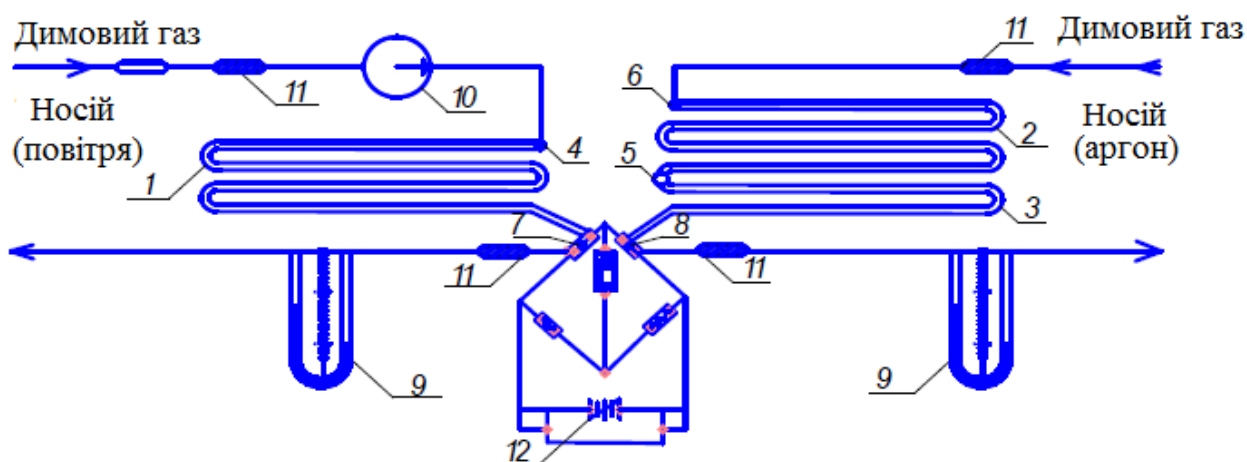


Рис. 1.9. Загальна схема хроматографа: 1-3 – розділові колонки, 4-6 – дозуючі пристрої, 7-8 – чутливі елементи, 9 – реометри, 10 – мікрокомпресор, 11 – фільтри-осушувачі, 12 – випрямляч

Газ-носіє (повітря) подається в розділову колонку 1 за допомогою мікрокомпресора мембранного типу 10 і потрапляє в робочу камеру детектора 7 з розташованим в ній чутливим елементом, в якому платинова нитка «замурована» в шар алюмогелю, виконаного у вигляді кульки. Інший газ-носіє (аргон) омиває сполучені послідовно розділові колонки 2 і 3 і потрапляє в робочу камеру детектора 8, в якій також розташований чутливий елемент. Витрата газів-носіїв, що надходять в прилад одночасно, контролюється за допомогою реометра 9. Чутливі елементи включені в схему вимірювального моста, що живиться від стабілізатора постійного струму 12.

Недоліком хроматографії є нелінійність ізотерм адсорбції, яка веде до несиметричності піків. Ця нелінійність пов'язана з геометричною і хімічною неоднорідністю поверхні звичайних активних адсорбентів. Неоднорідність і висока адсорбційна, а іноді і каталітична активність звичайних адсорбентів обмежує їх застосування в газовій хроматографії. Тому такі адсорбенти застосовуються в основному лише для аналізу газоподібних речовин, що не містять активних функціональних груп, ізотерми адсорбції яких при

використовуваних в хроматографії концентраціях і температурах близькі до лінійних.

Газоаналізатори зазвичай градууються у відсотках за об'ємом, тому що процентна частка окремих компонентів у загальному обсязі залишається незмінною при зміні тиску і температури газової суміші.

Механічні газоаналізатори засновані на вимірі молекулярно-механічних параметрів стану чи властивостей аналізованої газової суміші. Одним з найбільш поширених типів механічних газоаналізаторів є хімічні газоаналізатори, засновані на вимірі скорочення обсягу забраної проби газу після видалення аналізованого компонента. Видалення компонента здійснюється методами виборчого поглинання або роздільного догорання.

Оптичні газоаналізатори засновані на використанні залежності зміни тієї чи іншої оптичної властивості аналізованої газової суміші від зміни концентрації вимірюваного компонента. В оптичних газоаналізаторах використовуються такі оптичні властивості як спектральне поглинання, оптична щільність, показник заломлення, спектральне випромінювання газової суміші та ін.

До групи електричних відносять газоаналізатори, принцип дії яких заснований на вимірюванні якої-небудь електричної характеристики безпосередньо самого газу або рідини, з якою прореагував газ. При цьому вибирається електричний параметр, який залежить від концентрації, що визначається компонентом. Сучасні електрохімічні газоаналізатори, призначені для оптимізації та контролю режимів горіння в котельних установках, працюють на різних видах палива, крім вимірювання об'ємних часток ( $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}$  та інших компонентів), виконують також обчислення таких параметрів: ККД по зворотному балансу, коефіцієнт надлишку повітря, втрата тепла з газами, втрата тепла внаслідок хімічної неповноти згорання палива, втрата тепла з водяними парами.

До теплових газоаналізаторів відносяться прилади, засновані на вимірюванні теплових властивостей, що визначають компоненту газової суміші, яка є мірою його концентрації. В якості вимірюваних величин в газоаналізаторах цього типу використовуються теплопровідність газової суміші та корисний тепловий ефект реакції каталітичного окислення, що залежать від концентрації суміші, яка визначається. Теплові газоаналізатори поділяються на термокондуктометричні (по теплопровідності газової суміші) і термохімічні (по корисному тепловому ефекту реакції каталітичного окислення).

Магнітні газоаналізатори засновані на вимірюванні магнітних властивостей кисню і призначені для визначення масової частки кисню в суміші. Магнітні властивості газів зазвичай характеризуються значеннями об'ємної магнітної сприйнятливості і питомої або масової магнітної сприйнятливості. Всі відомі гази за характером і абсолютним значенням магнітних властивостей поділяються на діамагнітні і парамагнітні. Для діамагнітних газів об'ємна магнітна сприйнятливість  $k$  має від'ємне значення, для парамагнітних – позитивне. Питома магнітна сприйнятливість  $\chi$

визначається відношенням об'ємної магнітної сприйнятливості к до щільності газу  $\rho$ .

В основу фотоколориметричних газоаналізаторів покладена кольорова виборча реакція хімічної взаємодії між компонентами газової суміші, концентрація якої визначається, і індикаторним розчином.

На рис. 1.10 представлено систематизацію газоаналізаторів.

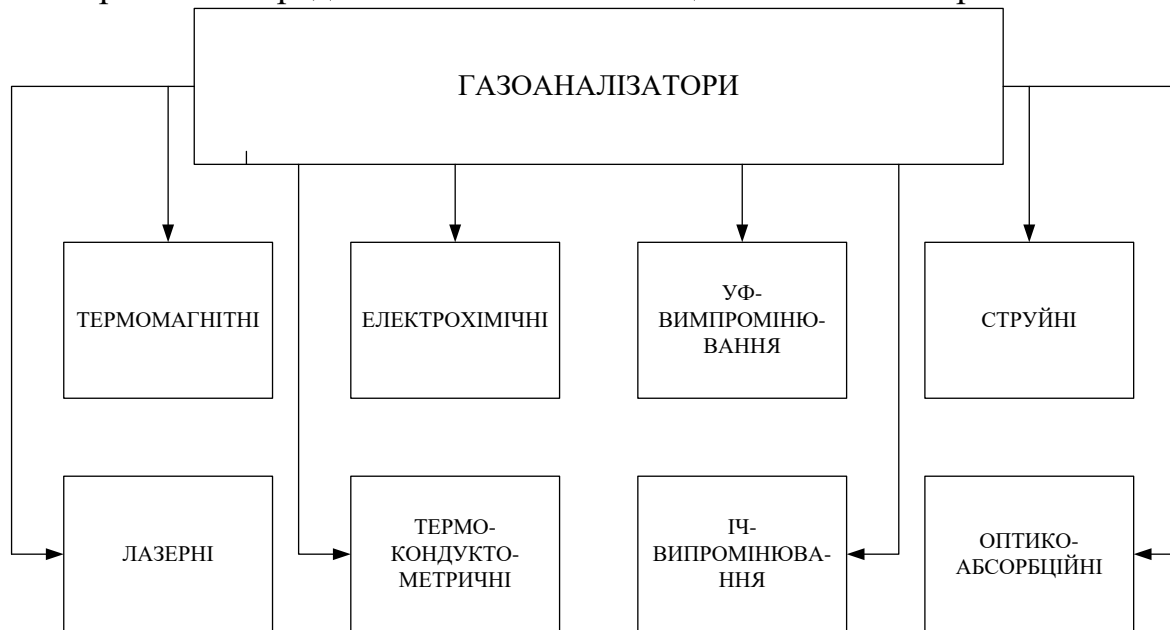


Рис. 1.10. Систематизація газоаналізаторів

Огляд сучасних засобів вимірювання кількісного значення концентрації компонентів димового газу представлено у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5

Сучасні засоби вимірювання концентрації компонентів газу (по каналу CO<sub>2</sub>)

Прилад	Діапазон температур, °С	Робочий тиск, кПА	Діапазон вимірювання, %	Зона не чутливості, с	Похибка, % / Вірогідність контролю*	Дрейф, %
A-8M	до 50	35	0,01 до 99.9	< 10	±1 / 0.8	< ± 1
NDIR Gas sensor MH-410D	-20 - 60	5	20 до 100	30	5 / 0.85	< ± 1

Продовження табл. 1.5

ОПТО ГАЗ -500.5	до 200	40	0-20	15	6/0.82	< ± 1
-----------------	--------	----	------	----	--------	-------

Ezodo СТН-37	до 400	40	0-50	10	5/0.94	< ± 1
-----------------	--------	----	------	----	--------	-------

\*значення вірогідності контролю було розраховано аналітично за відомими значеннями точності засобів вимірювання

Принцип роботи ряду відомих газоаналізаторів таких як: "Jarrelach" (США); "Riken Keiki" (Японія); «Коліон-1», «Джин-газ», «УПГЛ», «Газотест», «КГА-8», (Росія); "Multi-warn", "Raid1", "Microii", "Polytector" (Німеччина); "Detecteur mx21" (Франція) побудований на безперервному або періодичному калібрування обладнання, що використовується для обробки сигналів. Але алгоритми роботи цих приладів є обмеженими з точки зору контролю компонентів в областях якісного і кількісного аналізів, а також в області зміни впливних величин, що не задовольняє вимогам адаптивності.

Отже, можна зробити висновок, що існує дисбаланс за параметрами час обробки інформації - точність – чутливість – ціна, а, відтак, є актуальним розробка засобу контролю концентрації компонентів димових газів котельних установок.

### **1.7 Постановка задачі та обґрунтування подальших досліджень**

У розділі зроблено аналіз методів та засобів визначення концентрації газових сумішей. Здійснено огляд найбільш поширених методів газового аналізу, розглянуто їх переваги і недоліки, можливості застосування для розв'язання поставлених задач. Розповсюдженим недоліком більшості існуючих методів, за винятком оптичних, є їх невисока селективність, тобто часто визначенню концентрації газу заважає присутність інших компонентів. А низький поріг чутливості, тобто можливість визначати малі концентрації газів, характерні лише для електрохімічних та оптичних методів газового аналізу. Здійснений огляд показав, що найдоцільнішим є використання оптичних методів, серед яких для розв'язання поставлених задач найкращим є оптико-абсорбційний метод. Тому важливою метою подальшої роботи є вдосконалення оптимального методу контролю концентрації компонентів газів та його уніфікація орієнтовно особливостей об'єкта контролю. Для цього необхідно вирішити низку теоретичних та практичних задач:

- розробити математичну модель для визначення концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок, яка враховує та компенсує вплив впливних факторів (температури, тиску, вологості) на параметри вимірювача, що дозволить оцінити метрологічні характеристики засобу контролю для реальних умов експлуатації;

- розробити структурно-алгоритмічну організацію засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок на основі оптико-абсорбційного інфрачервоного методу, яка враховує вплив впливних факторів;

- розробити алгоритмічну організацію адаптації засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок до реальних умов експлуатації.

- розробити програмне забезпечення для автоматичного контролю двоокису вуглецю у димових газах котельних установок;

- оцінити вірогідність контролю та визначити точність вимірювання концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок;

- розробити експериментальний макет засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок.

Результати досліджень, що приведені в даному розділі опубліковані в таких роботах автора [108].



## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИМІРЮВАЧА КОНЦЕНТРАЦІЇ ДВООКИСУ ВУГЛЕЦЮ У ДИМОВИХ ГАЗАХ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК

#### 2.1 Аналіз спектрів поглинання сенсорів засобу контролю

Для визначення довжин налаштування фотоприймачів у засобі контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок проведемо аналіз спектрів поглинання газів [162-163], що є продуктами згорання котельної установки. У додатку Л представлено смуги поглинання основних продуктів спалювання (димових газів) котельної установки. Представимо таблицю Н.1 у вигляді карти спектрів у певних діапазонах.

Димові гази котельних установок, середньоочікувана концентрація яких вища за 0.1% об. та їх основні коливально-обертальні характеристики представлено у додатку рис. Л.1.

Параметри ізотопів основних димових газів котельних установок представлено у додатку рис. Л.7-Л.11.

Аналіз спектрів поглинання основних компонентів димових газів котельних установок у повному інфрачервоному діапазоні 0.75-15 мкм ( $13330\text{-}667\text{ см}^{-1}$ ) представлено на рис. 2.1-2.5.

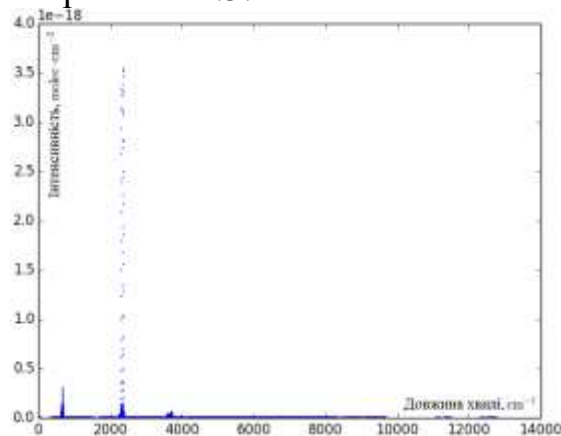


Рис. 2.1. Спектр поглинання  $\text{CO}_2$  у діапазоні 0.75-15 мкм

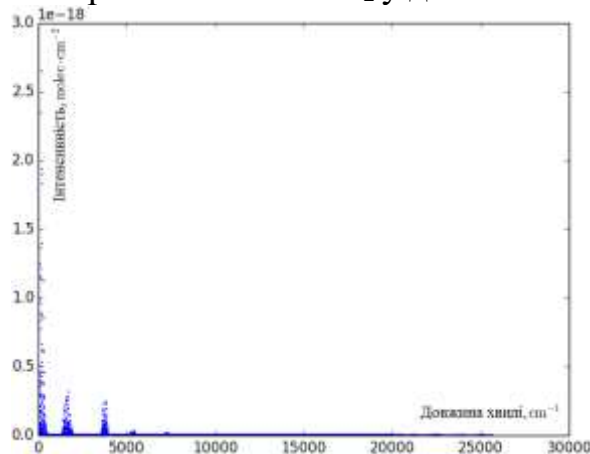


Рис. 2.2. Спектр поглинання  $\text{H}_2\text{O}$  у діапазоні 0.75-15 мкм

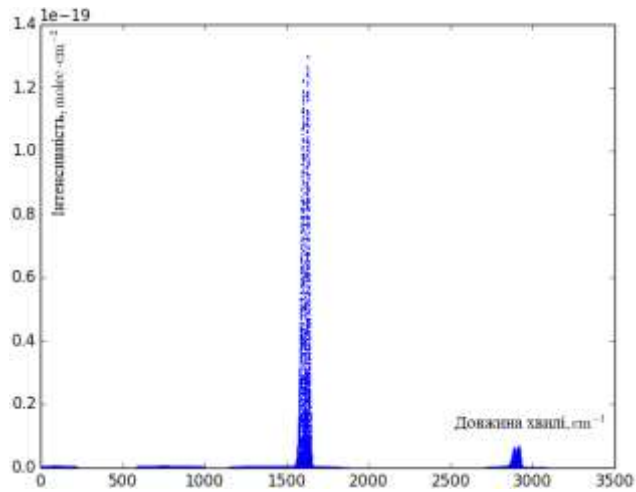


Рис. 2.3. Спектр поглинання N<sub>2</sub>O у діапазоні 0.75-15 мкм

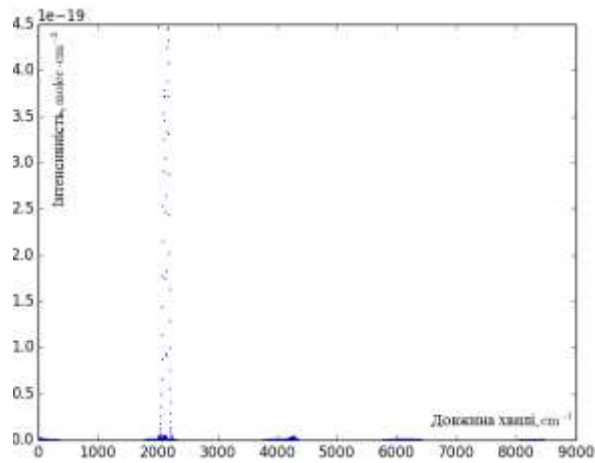


Рис. 2.4. Спектр поглинання CO у діапазоні 0.75-15 мкм

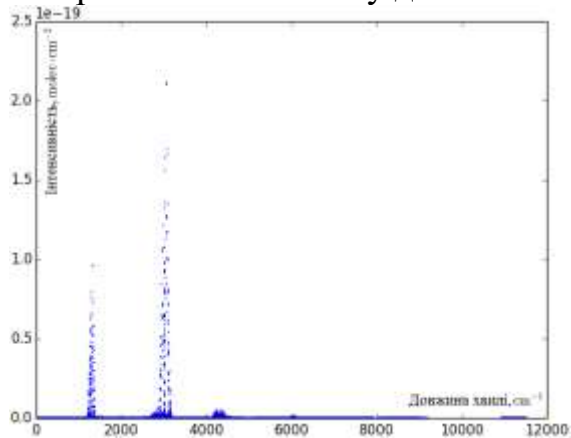


Рис. 2.5. Спектр поглинання CH<sub>4</sub> у діапазоні 0.75-15 мкм

Аналіз спектрів поглинання димових газів котельних установок в єдиній системі координат у робочому інфрачервоному діапазоні 1-10 мкм (1000-10000 см<sup>-1</sup>) представлено у додатку на рис. Л.12 – Л.20.

З аналізу спектрів зроблено висновок, що найактивніша область знаходиться в межах 2200-2500  $\text{cm}^{-1}$ . На рис. 2.6 представлено поглинання основних компонентів димових газів котельних установок у діапазоні 4 – 4.5  $\mu\text{m}$  (2200 – 2500  $\text{cm}^{-1}$ ).

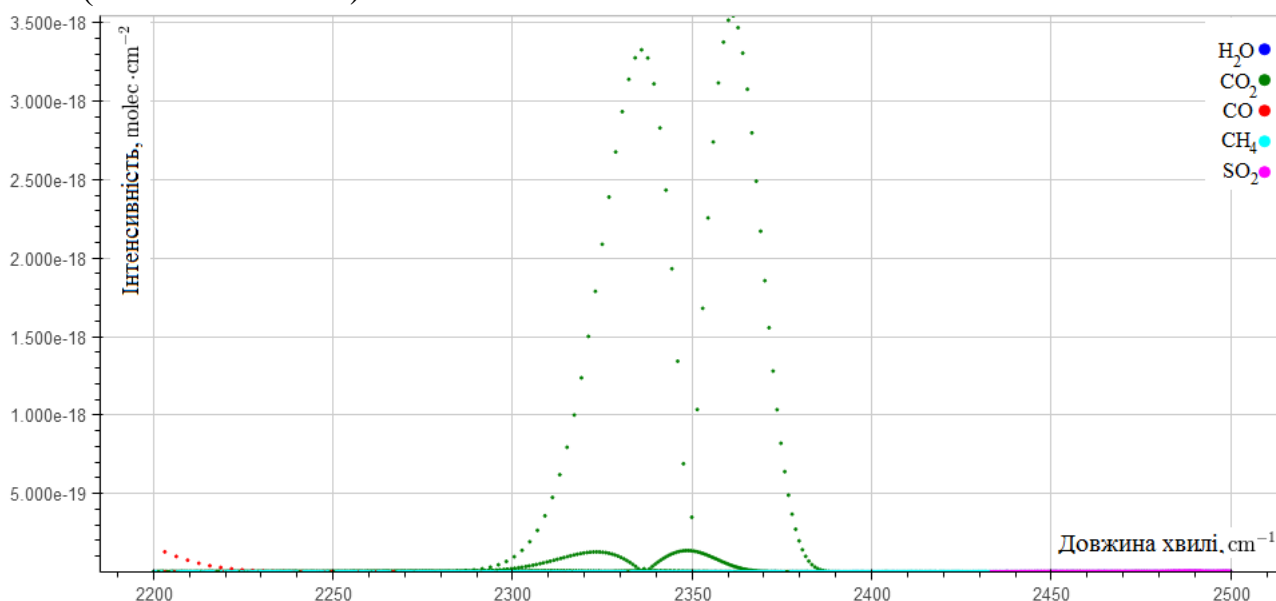


Рис. 2.6. Спектр поглинання основних компонентів димових газів котельних установок у діапазоні 4 – 4.5  $\mu\text{m}$

На рис. 2.7 схематично представимо смуги поглинання димових газів у широкому діапазоні роботи фотоприймачів.

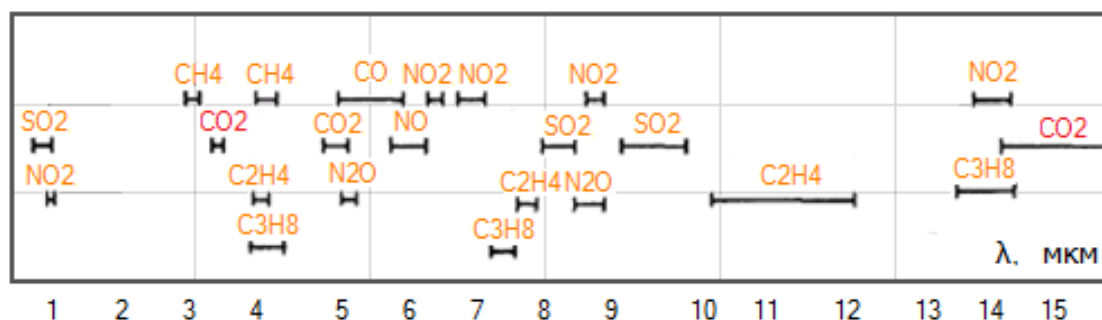


Рис. 2.7. Смуги поглинання димових газів у спектральному діапазоні 0,25...15  $\mu\text{m}$

Як видно з аналізу спектрів поглинання основних димових газів котельних установок практично всі смуги поглинання знаходяться поруч одна до одної (в деяких випадках накладаються). До того ж, пари води які присутні у газах, займають широкий спектр довжин смуг поглинання. Тому необхідною умовою є не лише вибір довжин поглинання газів таким чином, щоб вони не накладались один на одного, а і використовувати високоточні джерела випромінювання і приймачі (ширина роботи спектру яких не дозволяє потрапляння “сусідніх” газів). Після аналізу довжин поглинання димових газів необхідно за вже відомими вхідними даними обрати інфрачервоні

випромінювачі і приймачі. У додатку Л таблиці Л.2 представлено характеристики інфрачервоних лазерів, а таблиці Л.3 представлено параметри фотоприймачів.

На рисунку Л.21 у додатку Л представлено спектральні криві чутливості приймачів інфрачервоного випромінювання.

Таким чином, можна визначити параметри фотодіодів та фотоприймачів, при цьому було враховано взаємоперетин ліній поглинання. Тобто контрольні точки для кожного газу виглядають таким чином, що поруч немає ліній поглинання інших газів, що могли б вплинути на результати вимірювань.

## 2.2 Математична модель перенесення випромінювання в середовище димових газів котельних установок

Модель ослаблення випромінювання в середовище димових газів котельних установок представлена на рис. 2.8.

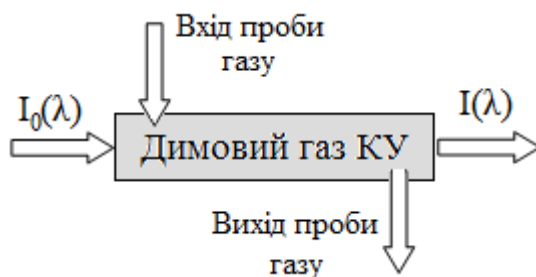


Рис. 2.8. Модель ослаблення випромінювання в середовище димових газів котельних установок

Представимо виведений у першому розділі закон Бугура-Ламберта-Бера який зв'язує інтенсивність опромінення, що пройшла через димовий газ, з концентрацією досліджуваного газу, довжиною шляху поглинання та коефіцієнтом поглинання у вигляді

$$I_l = I_0 \cdot e^{-\varepsilon Cl}, \quad (2.1)$$

де  $C$  – концентрацією досліджуваного газу,  $l$  – довжиною шляху поглинання,  $\varepsilon$  – показник послаблення.

Показник послаблення являє собою суму двох складових

$$\varepsilon = k_n + k_p, \quad (2.2)$$

де  $k_n$  та  $k_p$  – показники поглинання і розсіювання відповідно.

Завдяки конденсорній лінзі показник розсіювання у формулі (2.2) зникає. Отже, (2.2) можна переписати у вигляді

$$I_l = I_0 \cdot e^{-k_n Cl}. \quad (2.3)$$

Якщо концентрація виражається у моль/л, то показник поглинання  $k_n$  замінюється на молярний питомий показник поглинання  $\chi$  (одиниці вимірюваннях – [л/(моль·см)])

$$I_l = I_0 \cdot e^{-\chi Cl}. \quad (2.4)$$

Оскільки у формулі (2.4) концентрація газу  $C$  виражена у моль/л, а одиницею вимірювання концентрації у роботі є % об., необхідно дану залежність доповнити поправочним коефіцієнтом. Для початку представимо концентрацію у  $мг/м^3$ .

$$C_{\text{мг}/\text{м}^3} = C \cdot M \cdot 10^6, \quad (2.5)$$

де  $C_{\text{мг}/\text{м}^3}$  – концентрація газу ( $мг/м^3$ ),  $M$  – молярна маса досліджуваного газу ( $г/моль$ ).

Концентрація газу у  $мг/м^3$  пов'язана з об'ємною концентрацією %об. наступним співвідношенням (при умові 1% об. = 10000 ppm)

$$C_{\% \text{об.}} = \frac{C_{\text{мг}/\text{м}^3} \cdot \frac{R \cdot T}{P}}{M \cdot 10^4}. \quad (2.6)$$

Підставивши (2.5) у (2.6) отримаємо

$$C_{\% \text{об.}} = C \cdot 10^2 \cdot \frac{R \cdot T}{P}. \quad (2.7)$$

Температура і тиск мають суттєвий вплив на значення показника поглинання  $\chi$  і відповідно на коректність результатів визначення концентрації [164]. Для того щоб цей вплив оцінити запишемо аналітичну залежність  $\chi$  від  $T$  та  $P$ . Цю задачу вирішимо в два етапи. На першому перейдемо від молярного до спектрального показника поглинання. На другому виділимо  $T$  та  $P$  через відомий закон Клапейрона–Менделєєва.

Отже, молярний і спектральний показник поглинання зв'язані наступним співвідношенням:

$$\chi = k_n(\lambda) \cdot \frac{V}{\mu}, \quad (2.8)$$

де  $V$  – об'єм газу (л),  $\mu$  – кількість молів газу (моль).

В свою чергу,  $\mu$  залежить від молярного об'єму за нормальних умов  $V_m$  (22,4 л/моль) та об'єму який займає газ що аналізується за нормальних умов  $V_0$  (л).

$$\mu = \frac{V_0}{V_m}. \quad (2.10)$$

Прийmemo, що процес контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах є термодинамічним процесом, що протікають з незмінною масою при сталому значенні об'єму газу який аналізується. Тобто фактично приймаємо, що процес є ізохорним [169]

$$\frac{P}{T} = \text{const} \quad (2.11)$$

Запишемо закон Клапейрона–Менделєєва [170] у вигляді системи

$$\begin{cases} PV = \mu RT; \\ P_0 V_0 = \mu RT_0, \end{cases} \quad (2.12)$$

де  $R$  – універсальна газова стала.

Виділивши параметр  $\mu R$  та розв'язавши систему відносно  $V_0$  отримаємо

$$V_0 = \frac{PVT_0}{TP_0}. \quad (2.13)$$

Підставляючи (2.13) у (2.10) отримаємо

$$\mu = \frac{PVT_0}{TP_0V_m} \quad (2.14)$$

Скоротимо вираз (2.14). Для цього підставимо значення  $P_0$  та  $T_0$  за нормальних умов визначених згідно ІУРАС. Тоді

$$\mu = 1,2 \cdot 10^{-4} \frac{PV}{T}. \quad (2.15)$$

Отриманий вираз підставляємо у (2.9):

$$\chi = k_n(\lambda) \cdot \frac{8333, (3) \cdot T}{P}. \quad (2.16)$$

Із досліджених публікацій невідомо про існування адекватної аналітичної моделі значення тиску приведенного до об'єкту контролю. Відомо що через отвори входу та виходу димової труби повітря поєднується з атмосферою, що призводить до вирівнювання тиску (але не повного). В димовій трубі димовий газ знаходиться під абсолютним тиском, яке складається з атмосферного та надлишкового тиску (тиск розрідження 40-80 Па). Абсолютний тиск дорівнює сумі атмосферного тиску та розрідження (береться зі знаком мінус). Тоді

$$P_{аб.} = P_{атм.} - P_{розр.} \quad (2.23)$$

Але, слід відзначити, що атмосферний тиск згідно з вимогами міжнародного коду FM 12 SYNOP приведений до рівня моря. Для розрахунку тиску на висоті  $h$  (висота на якій працює засіб контролю концентрації димових газів котельних установок) по тиску на рівні моря  $P_0$  (саме цей тиск і підставляється в відому формулу 2.23) та температури повітря  $T$  використовуємо формулу

$$P_{атм.} = P_0 \cdot e^{\frac{M_m \cdot g \cdot h}{R \cdot T}}, \quad (2.24)$$

де  $M$  – молярна маса сухого повітря ( $0,029 \frac{кг}{моль}$ ),  $g$  – прискорення вільного падіння,  $h$  – висота, яка є сумою висоти димової труби та поверхні її основи над рівнем моря (наприклад, КУ ПТВМ-30 (м. Вінниця) знаходиться на висоті 294 метри над рівнем моря з висотою ДТ 90 метрів).

Тоді абсолютний тиск на об'єкті контролю виражається

$$P_{аб.} = P_0 \cdot e^{\frac{M_m \cdot g \cdot h}{R \cdot T}} - P_{розр.}. \quad (2.25)$$

## 2.3 Коефіцієнт поглинання CO<sub>2</sub> у димових газах котельних установок

Існують табличні значення спектрального показника поглинання  $k_n(\lambda)$  для основних газів, але вони приведені до нормальних або стандартних умов, що неприпустимо до об'єкту контролю, тому що [192] спектральний показник поглинання залежить від тиску і температури, і, як наслідок, від них залежить напівширина спектральної лінії.

Як було зазначено у першому розділі, поглинаюча здатність молекул газу в ІЧ-області обумовлена вібраційно-обертальним механізмом коливань молекул. З аналізу спектрів поглинання CO<sub>2</sub> має найбільш інтенсивну смугу поглинання з центральною довжиною 4,264 мкм. Контур цієї смуги описується функцією Лоренца [198] (запишемо дану функцію через довжину  $\lambda$ )

$$k_i(\lambda) = \frac{S(\lambda_i)}{\pi} \cdot \frac{\sigma}{\sigma^2 + \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_i}\right)^2}, \quad (2.26)$$

де  $S$  – інтенсивність смуги поглинання,  $\lambda$  та  $\lambda_0$  – довжина та центр смуги поглинання,  $\sigma$  – ширина смуги поглинання.

В свою чергу

$$S(\lambda_s) = \int_0^{\infty} k_s(\lambda) d\lambda. \quad (2.27)$$

При цьому Бреслер П.І. [194] запропонував розглядати смуги поглинання як нескінченну послідовність однакових за інтенсивністю та шириною рівновіддалених ліній  $\lambda_i$ .

Необхідну інформацію про газ (інтенсивність і спектральна напівширина ліній) можна знайти в базі даних HITRAN [190-193]. Дані про газ зберігаються в текстовому файлі і представляють собою таблицю, де по стовпчикам представлено найменування газу, хвильове число, інтенсивність лінії газу, спектральну напівширину ліній.

Таблиця 2.1

Фізичні властивості смуг поглинання димового газу

Порядковий номер газової суміші	Хвильове число ( $\nu$ )	Інтенсивність лінії газу ( $S$ )	Спектральна напівширина ліній ( $\sigma$ )
23	2373.455087	2.058E-30	.06800
63	2373.470292	1.330E-28	.06440
23	2373.473365	1.213E-25	.06010
21	2373.477165	7.860E-28	.07730
21	2373.484763	5.652E-27	.05860
24	2373.507231	2.038E-30	.05680
21	2373.524463	2.052E-29	.05610
23	2373.529430	1.972E-29	.07280

24	2373.556092	1.370E-30	.05660
11	2373.572984	9.372E-28	.01980
21	2373.576440	5.582E-28	.07940
61	2373.587840	1.521E-29	.04700
24	2373.629919	1.621E-23	.06580
61	2373.630875	6.218E-29	.04500
24	2373.636738	1.411E-30	.05660
21	2373.661105	3.602E-28	.08150
21	2373.665624	1.034E-18	.06810
61	2373.671538	3.617E-29	.04500
63	2373.681517	2.192E-28	.02240

Графічне моделювання фрагменту бази даних HITRAN представлено на рис. 2.9

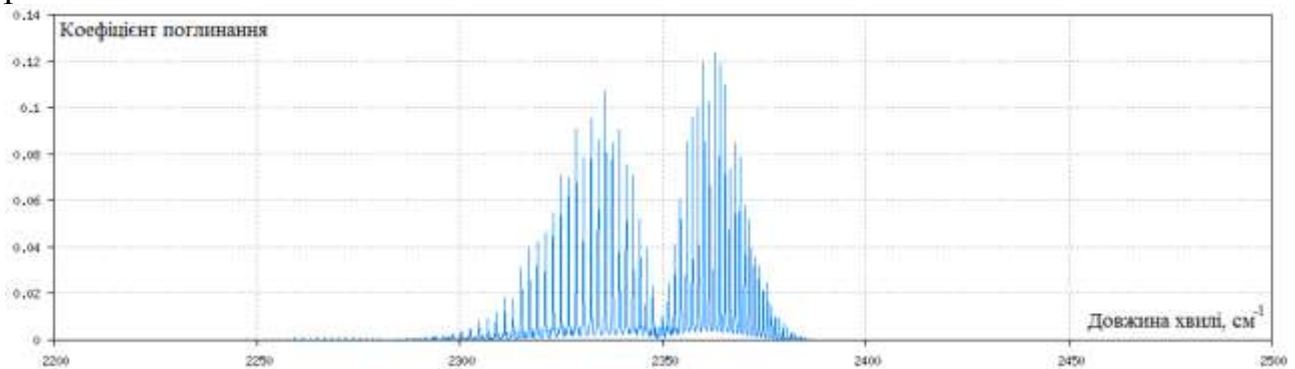


Рис. 2.9. Графічне моделювання фрагменту бази даних HITRAN

Як видно з рис. 2.8-2.9 спектр поглинання димового газу в заданому діапазоні має складну структуру за рахунок накладання спектрів газів які знаходяться у ньому, тому коефіцієнт поглинання  $k(\lambda)$  смуги виразимо сумою коефіцієнтів поглинання окремих ліній

$$k(\lambda) = \sum_i \frac{S(\lambda_i)}{\pi} \cdot \frac{\sigma}{\sigma^2 + \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_i}\right)^2} \quad (2.28)$$

При цьому кожна з спектральних ліній має такі важливі характеристики [171]:

1.  $\lambda_0$  – центр смуги поглинання (резонансна частота) не залежить від  $T$  та  $P$ .
2. Інтенсивність  $S$  не залежить від  $P$ , але залежить від  $T$ .
3. Ширина лінії  $\sigma_L$  має певну температурну залежність

Модель 2.28 враховує різні  $\lambda_{0i}$  та  $S(\lambda_i)$  для кожної окремої лінії поглинання, але при цьому значення  $\sigma_L$  повинні бути рівними (таким чином для розрахунку ряду 2.28 введено певне припущення). Спектри коефіцієнтів поглинання всіх газів задано в спектральній полосі (2,6 мкм ±). Таким чином модель 2.28 буде враховувати вплив впливних газів.

Для визначення поглинання  $CO_2$  у димових газах котельних установок використано таку методику [172].



Для розрахунку величини поглинання в спектральному інтервалі 4,1 – 4,3 мкм (2300-2400 см<sup>-1</sup>) використовувалась аналітична модель спектрального розподілу коефіцієнтів поглинання газу, розрахована на основі таблиць інтенсивності ліній  $S(\lambda_0)$  випромінювання газів в зазначеному спектральному діапазоні [172], що відповідає наступним наближенням:

1. Спектр коефіцієнта поглинання газу описується сумою розподілів Лоренца з різними  $\lambda_0$  і  $S(\lambda_0)$ , але однаковими значеннями  $\sigma_L$ .
2. Спектри коефіцієнтів поглинання всіх газів задаються в спектральній смузі 2300-2400 см<sup>-1</sup> (довжини хвиль випромінювання 4,1 – 4,3 мкм) з кроком 0,01 см<sup>-1</sup>. Виконання цієї умови необхідно для зручності аналізу сумішей газів і врахування впливу впливних газів.
3. У моделі враховуються тільки лінії, що мають інтенсивність  $S \geq 0,1$  [см·атм] при нормальних умовах вимірювання.

Отже, підставивши формули 2.7 у 2.4, 2.25 у 2.15, 2.28 у 2.16, загальний вигляд моделі буде таким:

$$I_l = I_0 \cdot e^{-\frac{\int_0^{\infty} k_s(\lambda) d\lambda}{\pi} \cdot \frac{\sigma}{\sigma^2 + \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_i}\right)^2} \cdot \frac{-0,0083 \cdot T}{P_0 \cdot e^{\frac{M_M \cdot g \cdot h}{R \cdot T} - P_{розр}}} \cdot \frac{C}{M} \cdot l} \quad (2.29)$$

Результати моделювання представлені на рис. 2.10-2.11.

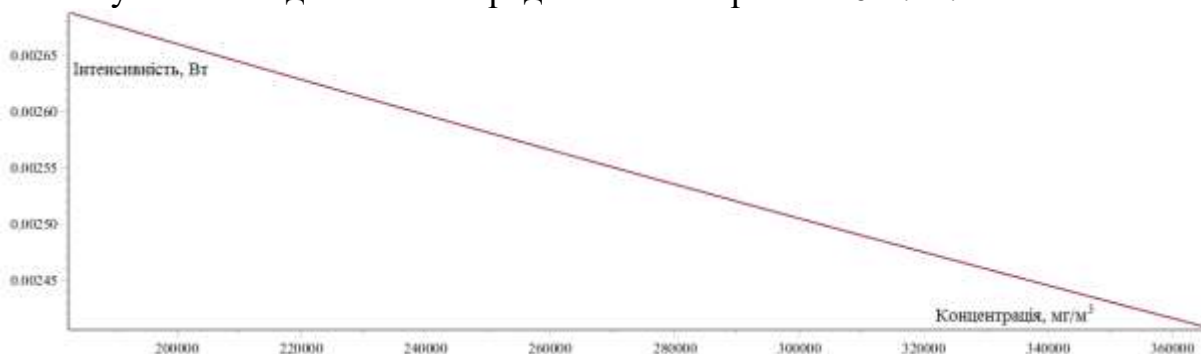


Рис. 2.10. Моделювання залежності концентрації димового газу від інтенсивності (в робочому діапазоні)

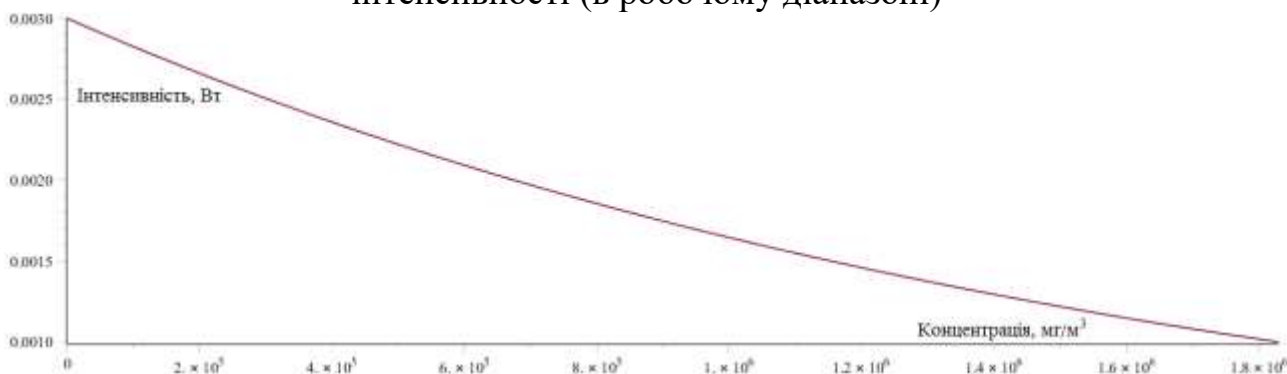


Рис. 2.11. Моделювання залежності концентрації димового газу від інтенсивності (в повному діапазоні)

Таким чином, математична модель (2.29) та її моделювання рис. 2.10-2.11 описує процес ослаблення випромінювання в оптичному вимірювальному

перетворювачі та враховує основні фактори, які пов'язані з особливостями об'єкту контролю, що впливають на її коректність.

## 2.4 Математична модель вимірювального перетворювача концентрації двоокису вуглецю в димових газах котельних установок

**ІЧ випромінювач.** В якості джерела ІЧ випромінювання використано світловипромінюючий діод (СВД). Ширина лінії генерації інфрачервоного випромінювання СВД складає 40–1000 нм. Це відповідає вимогам поставленої задачі, тому що лінії генерації випромінювання, вибрані із таким розрахунком, що на відстані ширини лінії генерації випромінювання не має інтенсивних ліній поглинання інших газів.

Основним недоліком СВД є залежність потужності випромінювання від температури засобу. При збільшенні температури потужність, яку випромінює діод, зменшується [173].

**Фотоприймач.** У статті [174] наведені результати проведених теоретичних досліджень фотоелектричного вимірювального перетворення площа-напруга, отримано основні математичні співвідношення, які його описують. У таких перетворювачах площа фоточутливого шару фотоприймача, яка освітлюється, змінюється під дією вимірюваної фізичної величини. В результаті, вихідна напруга такого перетворювача є функцією вимірюваної фізичної величини.

На рис. 2.12. наведена принципова та еквівалентна схеми фотоприймача на основі пари фотодіод - операційний підсилювач.

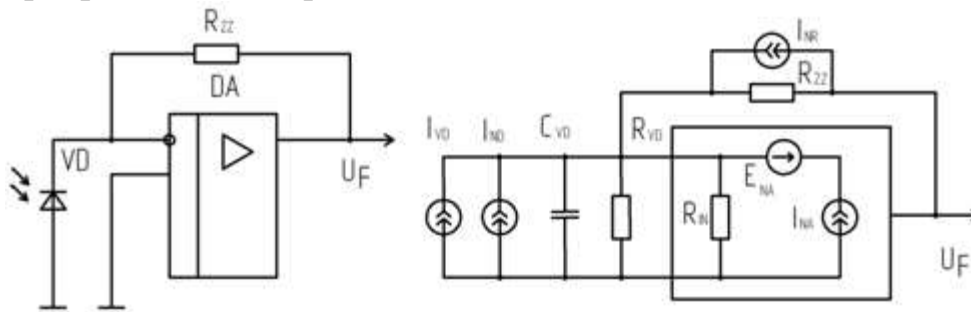


Рис. 2.12. Фотоприймач на основі пари фотодіод-операційний підсилювач

У наведеній схемі фотодіод VD діє як генератор струму, а операційний підсилювач DA, охоплений зворотнім зв'язком, перетворює цей струм у напругу. Залежність струму, що протікає через фотодіод, від потоку опромінення, описується виразом [175]

$$I_{VD} = \frac{\Phi \cdot S_{I0}}{\sqrt{1 + (\Omega \tau_{VD})}} - I_s \cdot (\exp(e \cdot U_{VD} / kT) - 1), \quad (2.29)$$

де  $I_{VD}$  – струм фотодіоду;  $\Phi$  – потік опромінення,  $S_{I0}$  – інтегральна струмова чутливість фотодіоду при немодульованому опроміненні;  $I_s$  – темновий струм фотодіоду;  $U_{VD}$  – падіння напруги на фотодіоді;  $T$  – абсолютна температура;  $k$  –

постійна Больцмана;  $e_e$  – заряд електрону;  $\Omega$  – циклічна частота модуляції потоку опромінення;  $\tau_{VD}$  – постійна часу фотодіоду, яка залежить від величин внутрішнього опору фотодіоду  $R_{VD}$  та паразитної ємності фотодіоду  $C_{VD}$ .

Вихідна напруга фотоприймача на основі пари фотодіод-операційний підсилювач, з урахуванням зміщення нуля, різниці вхідних струмів, напруги шуму, описується виразом [176]

$$U_F = \frac{I_{VD} \cdot R_{ZZ}}{1 + \frac{R_{ZZ}}{K_0 \cdot R_{IN}} + \frac{1}{K_0}} + \Delta I \cdot R_{ZZ} + U_{SM} + U_N, \quad (2.30)$$

де  $K_0$  - коефіцієнт передачі операційного підсилювача;  $R_{IN}$  - вхідний опір операційного підсилювача;  $U_{SM}$  - напруга зміщення нуля операційного підсилювача;  $\Delta I$  - різниця вхідних струмів операційного підсилювача;  $R_{ZZ}$  - опір в колі зворотнього зв'язку операційного підсилювача;  $U_N$  - напруга шуму на виході фотоприймача, яка залежить від шумового струму  $I_{NR}$  резистора в колі зворотнього зв'язку, шумового струму фотодіоду  $I_{ND}$ , шумового струму операційного підсилювача  $I_{NA}$  та шумової напруги операційного підсилювача  $E_{NA}$ .

Підставивши (2.29) в (2.30) та провівши перетворення, отримуємо

$$U_F = \frac{\Phi \cdot S_{I0} \cdot R_{ZZ}}{\left(1 + \frac{R_{ZZ}}{K_0 \cdot R_{IN}} + \frac{1}{K_0}\right) \cdot \sqrt{1 + (\Omega \tau_{VD})}} - \frac{I_S \cdot R_{ZZ} \cdot (\exp(e_e \cdot U_{VD}/kT) - 1)}{1 + \frac{R_{ZZ}}{K_0 \cdot R_{IN}} + \frac{1}{K_0}} + \Delta I \cdot R_{ZZ} + U_{SM} + U_N \quad (2.31)$$

При використанні джерела світла з конденсорною лінзою, можна отримати плоско-паралельний потік опромінення, однаковий на всій площині. У цьому випадку інтенсивність променевого потоку та площа фоточутливого шару фотодіоду, що опромінюється, зв'язані співвідношенням [177]

$$\Phi = I \cdot S, \quad (2.32)$$

де  $I$  - інтенсивність;  $S$  - площа фоточутливого шару фотоприймача, що освітлюється.

Підставимо формулу (2.32) у формулу (2.31) і отримаємо

$$U_F = \frac{I \cdot S \cdot S_{I0} \cdot R_{ZZ}}{\left(1 + \frac{R_{ZZ}}{K_0 \cdot R_{IN}} + \frac{1}{K_0}\right) \cdot \sqrt{1 + (\Omega \tau_{VD})}} - \frac{I_S \cdot R_{ZZ} \cdot (\exp(e_e \cdot U_{VD}/kT) - 1)}{1 + \frac{R_{ZZ}}{K_0 \cdot R_{IN}} + \frac{1}{K_0}} + \Delta I \cdot R_{ZZ} + U_{SM} + U_N \quad (2.33)$$

Як впливає з виразу (2.33), вихідна напруга фотоприймача на основі пари фотодіод-операційний підсилювач лінійно залежить від інтенсивності випромінювання опромінення.

Підставивши (2.28) у (2.33) отримаємо

$$U_F = \frac{I_0 \cdot \exp^{-K \cdot C_{\%об.л}} \cdot S_{I0} \cdot S \cdot R_{ZZ}}{\left(1 + \frac{R_{ZZ}}{K_0 \cdot R_{IN}} + \frac{1}{K_0}\right) \cdot \sqrt{1 + (\Omega \tau_{VD})}} - \frac{I_S \cdot R_{ZZ} \cdot (\exp(e_e \cdot U_{VD}/kT) - 1)}{1 + \frac{R_{ZZ}}{K_0 \cdot R_{IN}} + \frac{1}{K_0}} + \Delta I \cdot R_{ZZ} + U_{SM} + U_N \quad (2.34)$$

Співвідношення (2.34) описує фотоелектричне вимірювальне перетворення концентрація-напруга.

Таким чином, отримана математична модель функціонального зв'язку між вихідною напругою фотоприймача, на основі пари фотодіод-операційний підсилювач, з концентрацією компонентів димового газу котельних установок, темновим струмом фотодіода, шумовою складовою, напругою зміщення та різницею вхідних струмів операційного підсилювача, значеннями коефіцієнту передачі та вхідного опору операційного підсилювача.

**Моделювання.** Щільність шумового струму опору зворотного зв'язку [178]

$$I_{NR} = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot O \cdot \Delta f}{R_{ZZ}}}, \quad (2.35)$$

де  $\Delta f$  - ефективна смуга пропускання електронного тракту.

Щільність шумового струму фотодіоду, що працює у фотовольтаїчному режимі [183]

$$I_{ND} = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot O \cdot \Delta f}{R_{VD}}}. \quad (2.36)$$

Модуль вихідної напруги шуму визначається виразом [174]

$$U_N = \sqrt{E_{NA}^2 + (I_{NA}^2 + I_{ND}^2 + I_{NR}^2)R_{ZZ}}, \quad (2.37)$$

Вираз (2.33) можна спростити. Якщо світловий потік немодульований або циклічна частота модуляції потоку опромінення  $\Omega$  набагато менша ніж гранична частота фотодіоду і операційного підсилювача, то впливом їх частотних властивостей можна знехтувати. Різниця вхідних струмів  $\Delta I$  для сучасних операційних підсилювачів складає одиниці нА, а напруга зміщення  $U_{SM}$  - одиниці мВ. При умовах  $U_F \gg U_{SM}$  та  $I_{VD} \gg \Delta I$ , значеннями  $U_{SM}$  та  $\Delta I$  можна знехтувати. При використанні елементної бази з низьким рівнем шумів, шумовою складовою  $U_N$  виразу (2.33) можна знехтувати. Внаслідок малого значення темнового струму, яке складає одиниці наноампер, можна вважати, що  $I_S \approx 0$ . Вхідний опір сучасних операційних підсилювачів складає десятки або сотні МОм, що значно перевищує опір  $R_{ZZ}$  в колі зворотного зв'язку та внутрішній опір фотодіоду. Коефіцієнт передачі сучасних операційних підсилювачів також дуже високий і може досягати десятків тисяч. Виходячи з цього справедливий вираз

$$\lim_{\substack{K_0 \rightarrow \infty \\ R_{IN} \rightarrow \infty}} \left(1 + \frac{R_{ZZ}}{K_0 R_{IN}} + \frac{1}{K_0}\right) = 1. \quad (2.38)$$

З урахуванням усіх цих умов вираз (2.33) приймає вигляд

$$U_F = I_0 \cdot e^{\frac{\int_0^{\infty} k_s(\lambda) d\lambda}{\pi} \cdot \frac{\sigma}{\sigma^2 + (\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_i})^2} \cdot \frac{-0,0083 \cdot T}{P_0 \cdot e^{\frac{M \cdot g \cdot h}{R \cdot T} - P_{розр.}}} \cdot \frac{C \cdot I}{M}} \cdot S_{I0} \cdot S \cdot R_{ZZ}. \quad (2.39)$$

З виразу (2.39) випливає, що вихідна напруга фотоприймача на основі пари фотодіод-операційний підсилювач прямо пропорційна площі фоточутливого шару фотодіоду, що освітлюється, якщо знехтувати впливом темнового струму, шумовою складовою, напругою зміщення та різницею вхідних струмів операційного підсилювача, кінцевими значеннями коефіцієнту передачі та вхідного опору операційного підсилювача тощо.

Моделювання залежності концентрації CO<sub>2</sub> від напруги у робочому та повному діапазоні представлено на рис. 2.13-2.14.

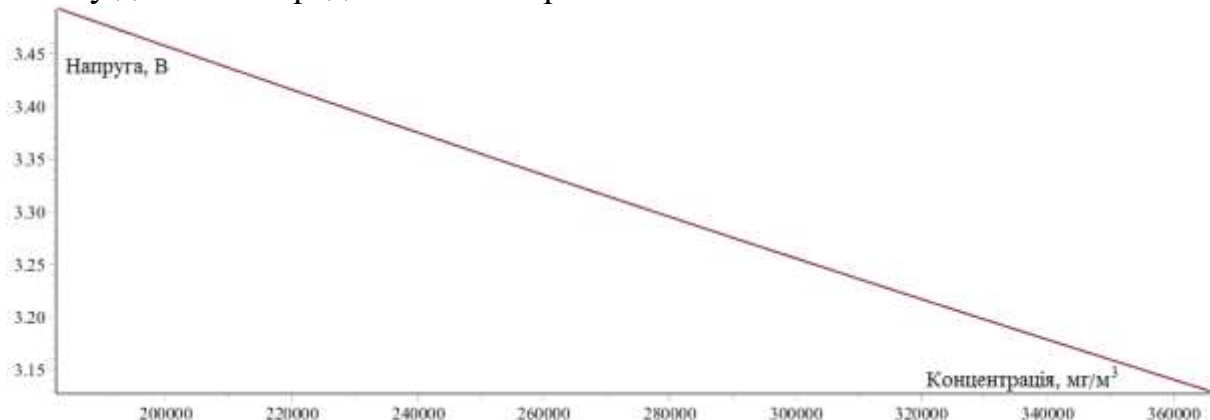


Рис. 2.13. Залежність напруга-концентрація (робочий діапазон)

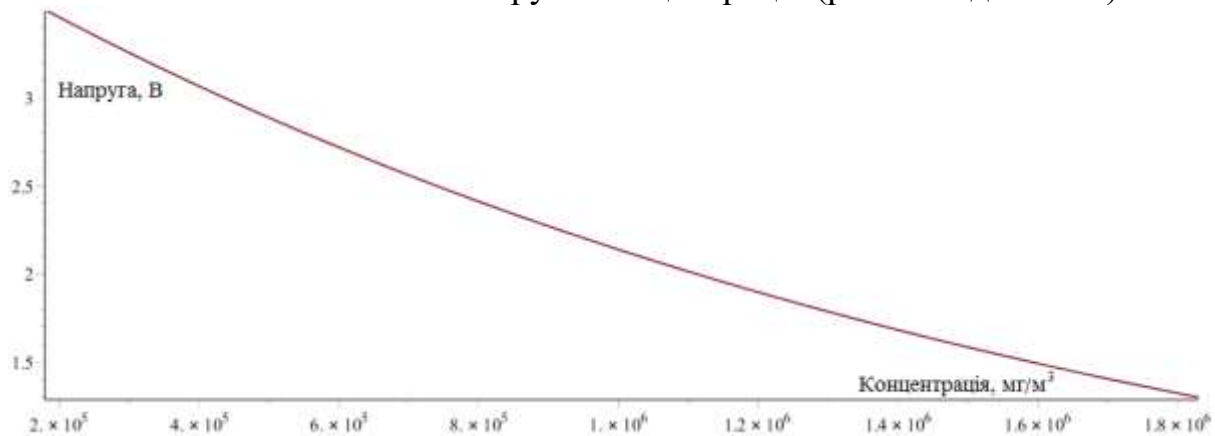


Рис. 2.14. Залежність напруга-концентрація (повний діапазон)

Моделювання проводилось при вхідній інтенсивності 3мВт, опорі зворотнього зв'язку 9.88МОм (ряд E192), інтегральній струмовій чутливості фотодіоду  $5.06 \frac{A}{M^2}$ , площею фоточутливого шару фотоприймача 26 мм<sup>2</sup>.

## 2.5 Рівняння перетворення додаткових вимірювальних каналів

На рис. 2.15. представлені фактори, які призводять до зміни напруги на виході оптичного сенсора і, як наслідок, впливають на значення концентрації двоокису вуглецю.

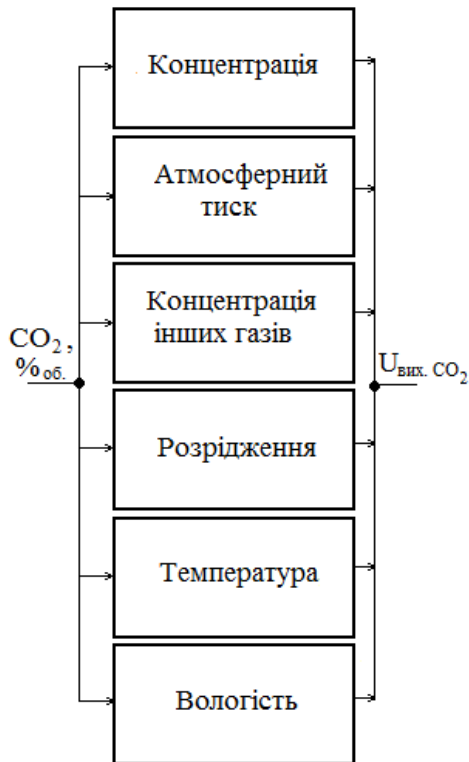


Рис. 2.15. Фактори, які призводять до зміни напруги на виході оптичного сенсора

Враховуючи те, що контрольованим параметром є не лише безпосередньо концентрація  $\text{CO}_2$ , а і інші фактори, які до того ж є аргументами у математичній моделі перенесення випромінювання в середовище димових газів, слід розглянути їх окремо.

Узагальнена структурна схема вимірювального каналу температури та розрідження представлено на рис. 2.16.

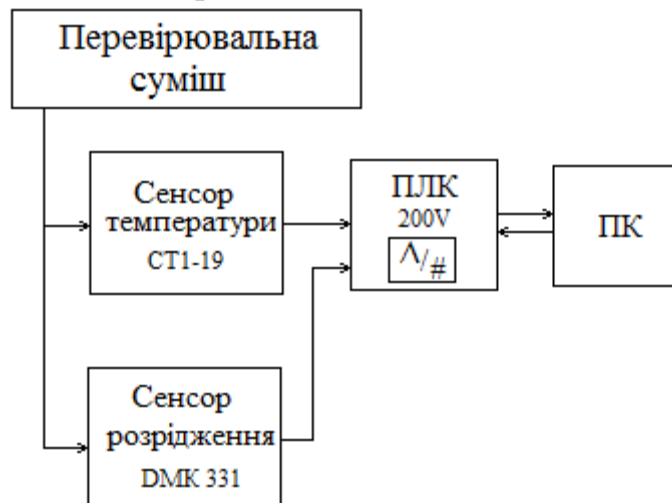


Рис. 2.16. Узагальнена структурна схема вимірювального каналу температури та розрідження

**Сенсор температури.** Після аналізу сучасних засобів вимірювання температури у заданих умовах [42], у засіб введено додатковий канал

вимірювання температури на основі терморезистивного промислового датчика (ТРД) СТ1-19 – напівпровідниковий резистор з нелінійною вольтамперною характеристикою, відмінною особливістю якого є різко виражена температурна залежність електричного опору. Датчик має високу чутливість, стабільність та точність ( $\pm 0.1$  °С), варіація показу ( $\pm 0.01$  °С), широкий діапазон вимірювань (-60–300 °С). Опір датчика зменшується при збільшенні температури, тобто це терморезистор з від’ємним температурним коефіцієнтом опору. В залежності від температури газової суміші терморезистор має електричний опір, що зв’язаний з температурою нелінійною функцією, яка описується формулою Стейнхард Харта (метод параметричної ідентифікації) [33, 34, 35, 36].

$$T = \frac{1}{C_0 + C_1 \cdot \ln R + C_2 \cdot (\ln R)^3}, \quad (2.40)$$

де  $T$  – температура, яка діє на ТРД;  $R$  – опір ТРД;  $C_{1,2,3}$  – коефіцієнти, які підбираються за умови найкращого наближення до отриманої експериментальної залежності.

В нашому випадку ТРД типу СТ1-19 має нелінійну залежність “опір-температура”, яка була отримана експериментально за допомогою еталонних вимірювальних перетворювачів з класом точності 0.2.

Графік експериментальної залежності “опір-температура” ТРД типу СТ1-19 представлена на рис. 2.17.

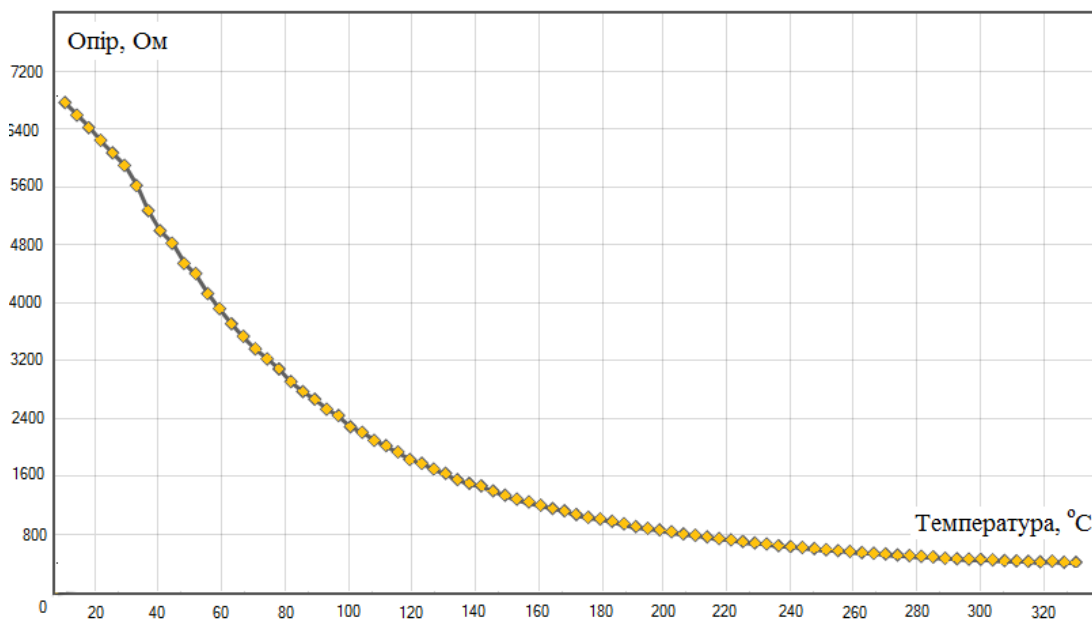


Рис. 2.17. Залежність опору ТРД СТ1-19 від температури

Аналітична залежність має вигляд

$$T = \frac{1}{0.18 - 0.056 \cdot \ln R + 0.0006 \cdot (\ln R)^3}. \quad (2.41)$$

Залежність зміни температури газової суміші від часу представлено на рис. 2.18 [59] (вимірювання проводились протягом  $2,4 \cdot 10^6$  секунд при роботі котла ДЕ-25-14 ГМ).

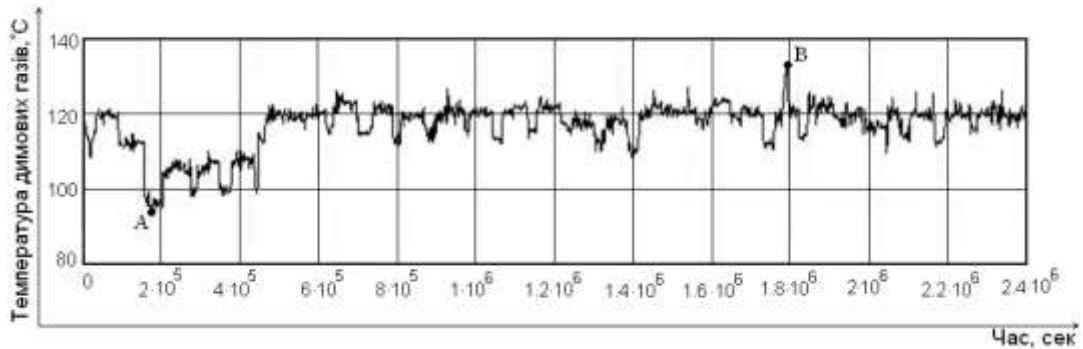


Рис. 2.18. Зміна температури газової суміші, що вийшла з топки, у часі

На отриманій залежності були визначені точки екстремумів А та В. Використавши експериментальну установку [36], яка містить у своєму складі кулер та нагрівач, за допомогою яких нагрівається, охолоджується та підтримується при заданій температурі димовий газ, який поступає на оптичний сенсор.

Напруга на виході сенсора температури має наступну аналітичну залежність

$$U_T = 12.5 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0.5. \quad (2.42)$$

Залежність напруги на виході сенсору від температури представлено на рис. 2.19

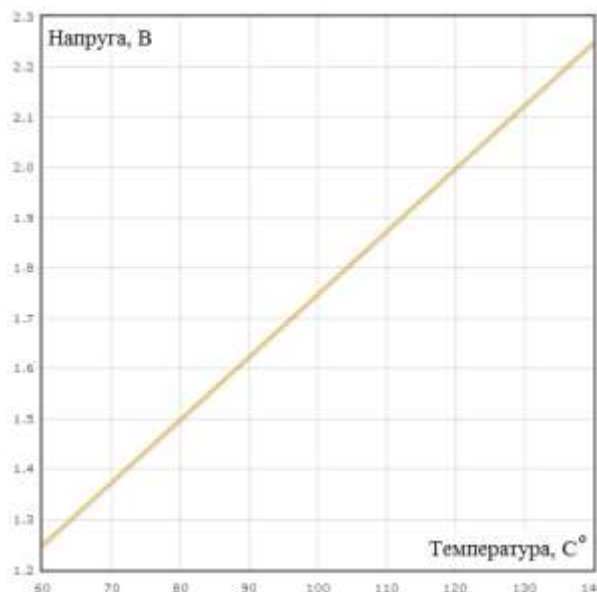


Рис. 2.19. Залежність напруги на виході сенсору від температури

Напруга на виході сенсору буде функцією від температури та код АЦП має вигляд

$$N_T = \frac{U_T}{U_0} \cdot 2^n, \quad (2.43)$$

де  $N_T$  – код АЦП на виході сенсора температури,  $U_T$  – значення напруги на виході сенсора температури,  $U_0$  – напруга опорного джерела живлення,  $n$  – розрядність АЦП.



Тоді код АЦП на виході сенсору температури (при розрядності ПЛК 12 та опорній напрузі 5.5 В)

$$N_T = \frac{\frac{12.5 \cdot 10^{-3}}{C_0 + C_1 \cdot \ln R + C_2 \cdot (\ln R)^3} + 0.5}{5.5} \cdot 2^{12}. \quad (2.44)$$

Залежність коду АЦП на виході сенсору від температури представлено на рис. 2.20

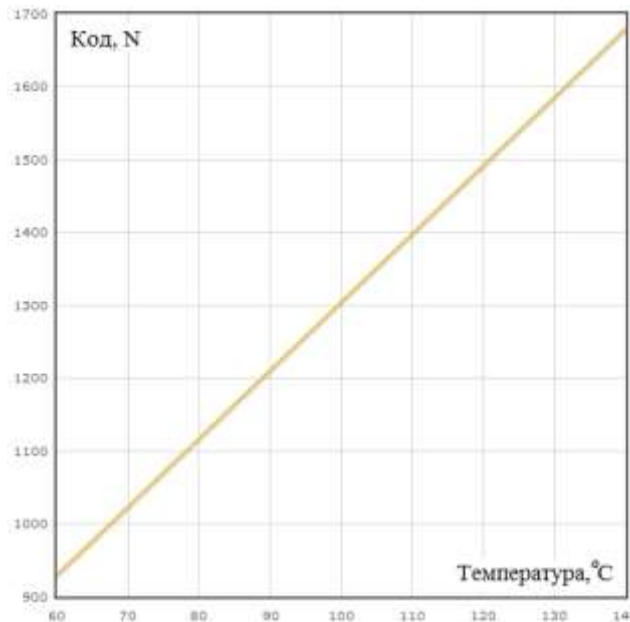


Рис. 2.20. Залежність коду АЦП на виході сенсору від температури

При вимірюванні в часі температури газового потоку приймач може не встигати слідкувати за зміною цієї температури внаслідок певного значення показника теплової інерції, який залежить від геометричної форми і розмірів чутливого елемента, теплоємності і густини матеріалу, з якого виготовлено чутливий елемент, а також коефіцієнта тепловіддачі між потоком і приймачем [41]. Якщо перехідний режим роботи ВП є надто інерційним та суттєво впливає на значення сумарної похибки вимірювального каналу (засобу), можна скористатись роботою [42], де розглянуто методи вимірювання швидкозмінних температур газових потоків шляхом введення поправок у покази інерційних приймачів температури та описано методику проведення таких вимірювань.

**Сенсор розрідження.** Для вимірювання тиску розрідження був використаний сенсор BD sensors DMK 331 [97] – це промисловий сенсор, особливістю якого є здатність працювати у агресивному середовищі. Діапазон вимірювань 5-120кПа. Відносна похибка не більше 0.25% . Сенсор має лінійну залежність вхідного і вихідного сигналів. Рівняння перетворення має вигляд:

$$U_p = 3.33 \cdot 10^{-5} \cdot P_{розр} + 0.99, \quad (2.45)$$

де  $U_p$  – напруга на виході сенсора.

Залежність напруги на виході сенсора від тиску представлено на рис. 2.21

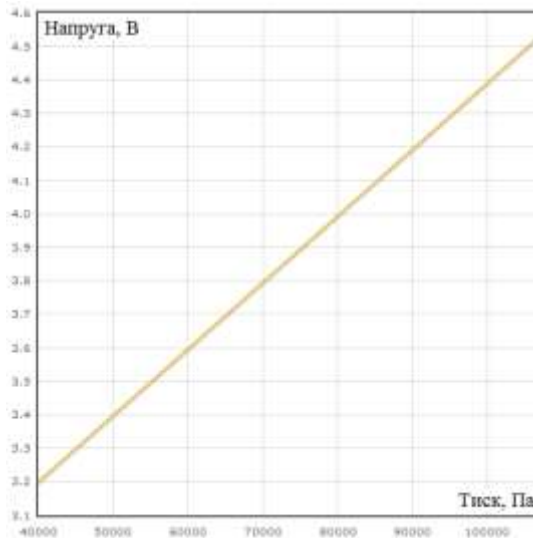


Рис. 2.21. Залежність напруги на виході сенсора від тиску

Із врахуванням перетворення сигналу в АЦП загальне рівняння буде:

$$N_p = \frac{U_p}{U_0} \cdot 2^n = \frac{3.33 \cdot 10^{-5} \cdot P_{розр} + 0.99}{5.5} \cdot 2^{12} \quad (2.46)$$

Залежність коду АЦП на виході сенсора від тиску представлено на рис. 2.22.

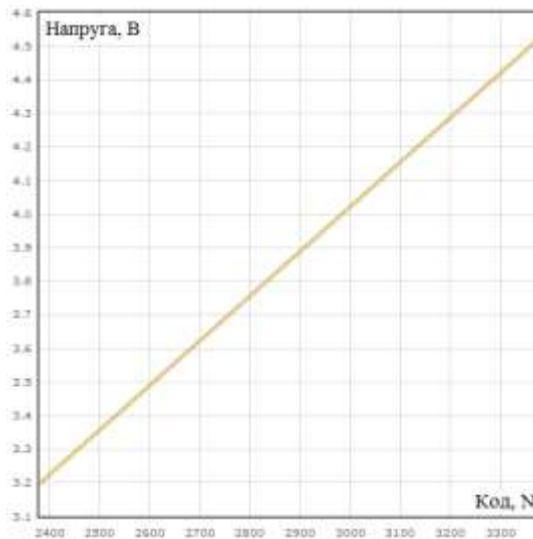


Рис. 2.22. Залежність коду АЦП на виході сенсора від тиску

**Вологость.** У роботах [44, 45] розроблено аналізатори вологості газових сумішей. На основі експериментальних досліджень визначено, що аналізатор відповідає наступним вимогам: швидкий відгук, відсутність впливу агресивних домішок. У класичному випадку задача врахування фактору вологості у димових газів вирішується шляхом введення у засіб контролю додаткового вимірювального каналу. Сигнал на виході каналу вологості визначає поправку до показів концентрації CO<sub>2</sub>. Але, враховуючи те що у роботі стоїть задача розробки методів компенсації впливу впливних газів в тому числі і парів води,

задача компенсація вологості вирішується шляхом введення опорного оптичного каналу (детально розглянуто у розділі 2.7).

**Запиленість.** Після опрацювання роботи [134] вплив запиленості на показники оптичних сенсорів, було прийняте інженерне-технічне рішення щодо побудови засобу контролю концентрації компонентів димових газів котельних установок з відкритим оптичним каналом (детально розглянуто у розділі 3).

## 2.6 Дослідження коефіцієнту передачі та чутливості оптичного газового сенсора

### 2.6.1 Аналіз коефіцієнту передачі оптичного газового сенсора

На основі 2.33 запишемо закон Бугера-Ламберта-Бера у вигляді

$$U(C, \lambda, I_0) = U_0(I_0, \lambda) \cdot \exp[-\alpha(\lambda) \cdot L \cdot C] \quad (2.47)$$

Пристрій, що здійснює перетворення вхідної величини  $C$  в вимірювану величину  $U(I, C, \lambda)$ , є вимірювальним перетворювачем. В засобі контролю складу димових газів функцію вимірювального перетворювача виконує оптичний сенсор.

В останні роки оптичні сенсори будують на основі світло-і фотодіодів [202], які дозволяють внести істотні поліпшення в конструкцію сенсора: відмовитися від механічних модуляторів, інтерференційних фільтрів, знизити енергоспоживання і габарити. Подальші перспективи вдосконалення ІЧ-газоаналізаторів пов'язані зі створенням нової, більш ефективною елементної бази газових сенсорів, в першу чергу джерел і приймачів ІЧ-випромінювання. Структурна схема розробленого оптичного сенсора представлена на рис. 2.23.

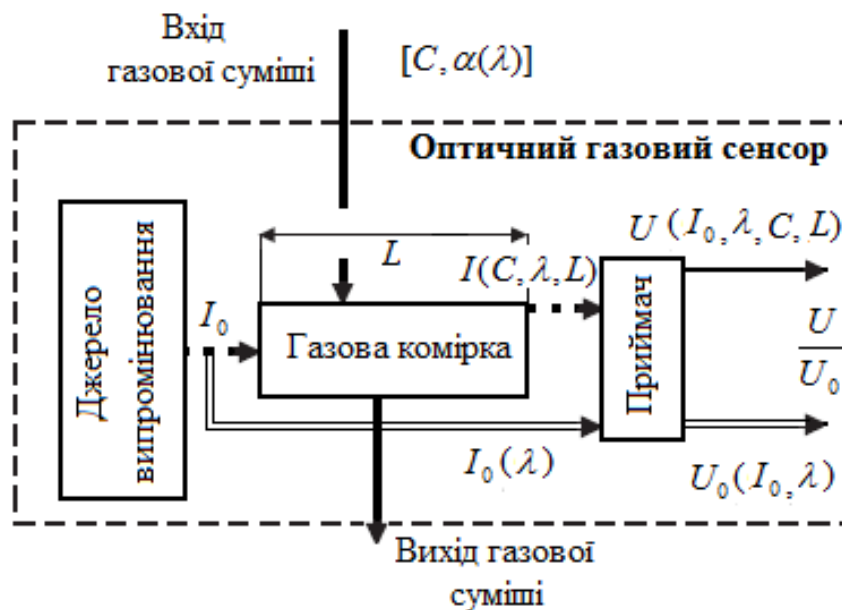


Рис. 2.23. Структурна схема розробленого оптичного газового сенсора

В якості вихідного сигналу оптичного сенсора представимо коефіцієнт пропускання опромінювання в кюветі з газом

$$k_{np}(C, L, \alpha(\lambda)) = \frac{U(I_0, \lambda, C, L)}{U_0(I_0, \lambda)}. \quad (2.48)$$

При використанні СВД та ФД із спектральними характеристиками, які перекривають деяку смугу частот  $\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ . Зміщення спектральних характеристик джерела і приймача випромінювання внаслідок зміни температури та тиску властиве всім СВД та ФД. Для оцінки впливу температури та тиску, які діють на оптичний сенсор і, як наслідок, на значення концентрації газу введемо параметри  $T$  та  $P$  в функції спектральних характеристик джерела та приймача ПЧ випромінювання. Фотоприймач вимірює інтегральний сигнал і передаточна функція оптичного сенсора описується інтегральним виразом

$$k_{np}(C, L, P, T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{PhD}(\lambda, T, P) \cdot I_{LED}(\lambda, T, P) \cdot \exp[-\alpha(\lambda) \cdot L \cdot C] d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{PhD}(\lambda, T, P) \cdot I_{LED}(\lambda, T, P) d\lambda}, \quad (2.49)$$

де  $S_{PhD}(\lambda, T)$  - спектральна чутливість фотоприймача,  $I_{LED}(\lambda, T)$  - спектральна потужність джерела,  $\alpha(\lambda)$  - спектр коефіцієнта поглинання газу,  $L$  - довжина оптичного тракту (довжина взаємодії випромінювання з газом).

## 2.6.2 Дослідження впливу ширини спектру приймача ПЧ випромінювання на чутливість оптичного каналу газового сенсора

У попередніх дослідженнях встановлено, що для підвищення чутливості необхідно звужити ширину спектра випромінювання [179]. Для підвищення чутливості оптичного газового сенсора вирішимо наступні задачі:

- вдосконалити оптичну частину засобу контролю димових газів котельних установок шляхом введення у його склад фільтру;
- проаналізувати вплив ширини спектра випромінювання джерела на чутливість та точність оптичного газового сенсора.

Для аналізу шляхів підвищення чутливості зроблено дослідження ширини спектральної характеристики потужності джерела ПЧ випромінювання на чутливість оптичного газового сенсора.

Характеристика світлодіода представлена на рис. 2.37. Для аналітичного опису характеристики використаємо рівняння [180]:

$$S_{CD} = S_0 \cdot \exp(-b_u^2 \cdot (\lambda - \lambda_0)) = \frac{\Phi_0}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\ln 2}{\Delta\lambda_0} \cdot (\lambda - \lambda_0), \quad (2.50)$$

де  $S_0$  - спектральна чутливість потужності випромінювання,  $\Phi_0$  - оптична потужність випромінювання,  $\lambda_0$  - центральна довжина хвилі оптичної характеристики,  $b_u$  - коефіцієнт, який залежить від напівширини спектральної характеристики  $\Delta\lambda_0$ .

Оптичний сигнал на виході кювети з газом представлено у вигляді [181]:

$$S_{вих}(\lambda, C_%, l) = S_{CD}(\lambda) \cdot k_k(\lambda, C_%, l) \quad (2.51)$$

де  $k$  - коефіцієнт пропускання кювети з газом, що аналізується.

Вихідний сигнал приймача випромінювання запишемо у вигляді [182]:

$$\Phi_{\text{вихФД}}(\lambda, C_{\%}, l) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\text{вих}}(\lambda, C_{\%}, l) d\lambda, \quad (2.52)$$

В якості інформаційного параметру оптичного газового сенсора виступає зміна інтенсивності після проходження інфрачервоної радіації через пробу газу

$$D = \frac{\Phi_{\text{ФД}}}{\Phi_{\text{СД}}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\text{вих}}(\lambda, C_{\%}, l) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\text{вих}}(\lambda, l) d\lambda}, \quad (2.53)$$

Використовуючи розроблену математичну модель спектра поглинання CO<sub>2</sub> була отримана залежність D від %<sub>об.</sub>. Залежність інформаційного параметру оптичного газового сенсора від концентрації двоокису вуглецю представлено на рис. 2.24.

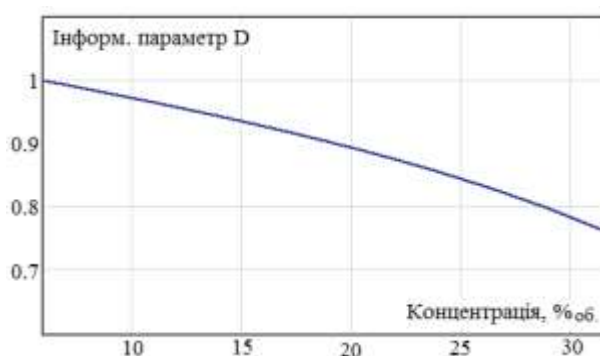


Рис. 2.24. Залежність інформаційного параметру оптичного газового сенсора від концентрації двоокису вуглецю

Чутливість оптичного газового сенсора було розраховано за формулою

$$k_{\text{led}} = \frac{\Delta y C_{\% \text{об.}}}{\Delta C_{\% \text{об.}}} = -0.01 \frac{1}{\% \text{об.}}. \quad (2.54)$$

Виходячи з отриманих даних, можна зробити висновок, що чутливість оптичного газового сенсора досить висока за рахунок підбору LED з вузьким спектром випромінювання.

Також можна зробити висновок, що залежність інформаційного параметра від % має певну нелінійність. Для отримання максимально лінійної залежності було використано оптичний фільтр, який виділяє випромінювання в діапазоні довжини хвиль 40-60 нм. Залежність D від % з використанням оптичного фільтру та без представлено на рисунку 2.25.

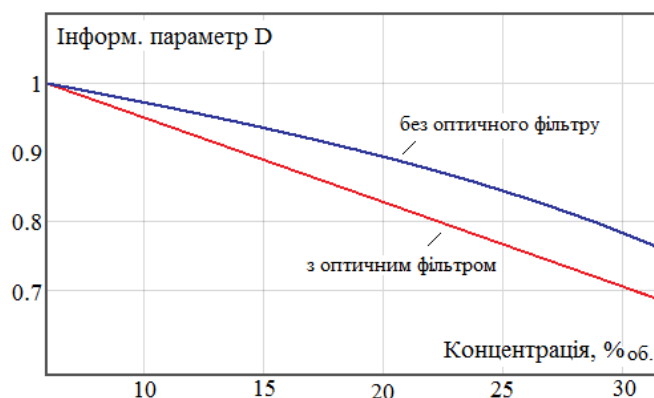


Рис. 2.25. Залежність інформаційного параметру оптичного газового сенсора від концентрації двоокису вуглецю з оптичним фільтром, без оптичного фільтру

Чутливість оптичного газового сенсора з фільтром

$$k_{led} = \frac{\Delta y C_{\% об.}}{\Delta C_{\% об.}} = -0.011 \frac{1}{\% об.} \quad (2.55)$$

Таким чином, чутливість оптичного газового сенсора збільшується приблизно на 10% та залежність D від % носить лінійний характер у всьому робочому діапазоні.

Залежність відносної похибки вимірювання з оптичним фільтром та без оптичного фільтру представлено на рис. 2.26.

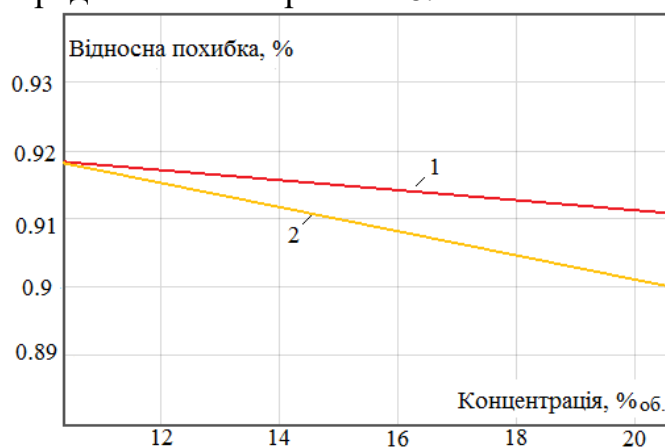


Рис. 2.26. Залежність відносної похибки вимірювання з оптичним фільтром, без оптичного фільтру

Таким чином, відносна похибка оптичного газового сенсора зменшується приблизно до 0.05% в залежності від діапазону.

## 2.7 Дослідження опорної та робочої довжини хвилі для оптичного газового сенсора та розробка методу адитивно-мультиплікативної компенсації впливних факторів

З аналізу спектрів можна зробити висновок, що поглинання двоокису вуглецю в діапазоні  $1900 \text{ см}^{-1}$  майже дорівнює нулю. Тоді в якості джерела ІЧ

випромінювання для опорного оптичного каналу використаємо лазер з робочою довжиною  $\lambda=1900 \text{ см}^{-1}$ . Слід зазначити, що в цьому діапазоні поглинання  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  складає від  $10^{-21}$  до  $10^{-23}$  см/моль, що на декілька порядків вище ніж поглинання  $\text{CO}_2$  в цьому діапазоні.

Довжина робочої та опорної хвиль і чутливість поглинання представлені на рис. 2.27.

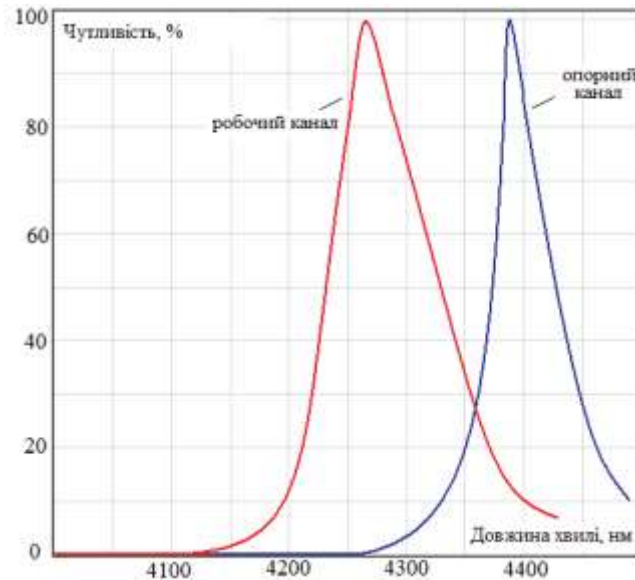


Рис. 2.27. Залежність чутливості поглинання від довжини хвилі

**Модель впливу факторів, які призводять до зміни напруги на виході оптичного сенсора.** На рис. 2.28 представлені фактори, які призводять до зміни напруги на виході оптичного сенсора.

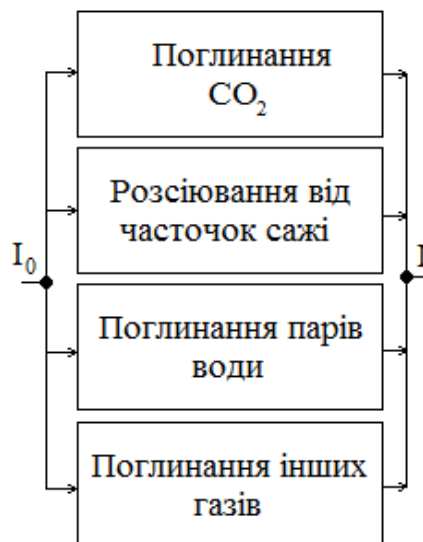


Рис. 2.28. Фактори, які призводять до зміни напруги на виході оптичного сенсора

Не характерним фактором, що впливає на вихідну інтенсивність випромінювання на виході оптичного тракту є розсіювання від часточок сажі, на відміну від поглинання, яке описується законом Бугера-Ламберта-Бера. Потік послаблюється через розсіювання світла при потраплянні на часточки

сажі. Проблемою є те, що часточки сажі не однорідні та різних розмірів, до того ж їх кількість може змінюватись з часом.

Сумарна інтенсивність світла, що розсіюється при потраплянні на часточки сажі залежить від параметра  $\varepsilon$

$$\varepsilon = 2 \cdot \pi \cdot r_{ч.с.}, \quad (2.56)$$

де  $r$  – розмір часточки сажі.

Якщо  $\varepsilon < 1$  (розміри сажі до 0,1 мкм), тоді інтенсивність розсіювання пропорційна  $r_{ч.с.}^6$ , при  $\varepsilon = 1$  (розміри сажі до 1 мкм) – інтенсивність розсіювання пропорційна  $r_{ч.с.}^4$ , при  $\varepsilon > 1$  (розміри сажі більше 1 мкм) – інтенсивність розсіювання пропорційна  $r_{ч.с.}^2$ .

В загальному випадку інтенсивність розсіювання  $I_{роз}$  описується рівнянням Мі [179]

$$I_{роз} = \frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi^2 \cdot l^2} \cdot (i_1 + i_2), \quad (2.57)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі,  $l$  – відстань від джерела випромінювання до часточки сажі,  $i_1, i_2$  – інтенсивність світла, що розсіюється (поляризованого перпендикулярно і паралельно площі розсіювання).

Існують методи експериментальної оцінки усереднених розмірів часточок сажі, але такі методи є неточними, оскільки залежать від багатьох факторів топочних процесів і складу палива.

**Розробка методу адитивно-мультиплікативної компенсації впливних факторів.** У роботі [179] розглянуто два варіанти алгоритму компенсації дестабілізуючих факторів на параметри оптичного перетворювача – лінійний та нелінійний. На основі даних досліджень розроблено алгоритми адитивної та мультиплікативної компенсації впливних факторів, які адаптовані до об'єкту контролю.

Інтенсивність на виході робочого оптичного каналу згідно моделі

$$I_{вих.р.к} = I_{LEDр.к} \cdot e^{k_1} \cdot e^{k_2} \cdot e^{k_3} \quad (2.58)$$

де  $k_1 = k_{роз}$ ,  $k_2 = k_{нозгл.CO2}$ ,  $k_3 = k_{нозгл.H2O+CO+SO2+CH4+NO2}$ .

Напруга на виході робочого оптичного каналу згідно моделі

$$U_{вихр.к} = I_{LEDр.к} \cdot e^{k_1} \cdot e^{k_2} \cdot e^{k_3} \cdot S_{I0р.к.} \cdot S_{р.к} \cdot R_{ззр.к.} \quad (2.59)$$

Інтенсивність на виході опорного оптичного каналу згідно моделі

$$I_{вих.о.к} = I_{LEDo.к} \cdot e^{k_1} \cdot e^{k_3} \quad (2.60)$$

Напруга на виході опорного оптичного каналу згідно моделі

$$U_{вихо.к} = I_{LEDo.к} \cdot e^{k_1} \cdot e^{k_3} \cdot S_{I0о.к.} \cdot S_{о.к} \cdot R_{ззо.к.} \quad (2.61)$$

Прийmemo, що

$$\begin{cases} S_{I0р.к.} \approx S_{I0о.к.} \\ S_{р.к} = S_{о.к} \\ R_{ззр.к.} = R_{ззо.к.} \end{cases} \quad (2.62)$$



Аддитивна компенсація впливних факторів виражена через інтенсивність має вигляд

$$\begin{aligned} Add &= I_{вих.о.к} - I_{вих.р.к} = I_{LEDo.к} - \Delta I_{роз.LED.о.к} - \Delta I_{k3о.к} \\ &- I_{0LEDp.к} - \Delta I_{co_2p.к} - \Delta I_{k3p.к} - \Delta I_{роз.LED.p.к} = \Delta I_{co_2p.к} \end{aligned} \quad (2.63)$$

Аддитивна компенсація впливних факторів виражена через напругу має вигляд

$$\begin{aligned} Add &= U_{вих.о.к} - U_{вих.р.к} = I_{LEDo.к} \cdot e^{k^{роз.}} \cdot e^{k^3} \cdot S_{10о.к} \cdot S_{о.к} \cdot R_{zзо.к} - \\ &- I_{LEDp.к} \cdot e^{k^{роз.}} \cdot e^{k^{роз.CO_2}} \cdot e^{k^3} \cdot S_{10p.к} \cdot S_{p.к} \cdot R_{zзp.к} = \Delta U_{co_2p.к} \end{aligned} \quad (2.64)$$

Мультиплікативна компенсація впливних факторів виражена через інтенсивність має вигляд

$$Mul = \frac{I_{вих.р.к}}{I_{вих.о.к}} = \frac{I_{LEDp.к} \cdot e^{k^1} \cdot e^{k^2} \cdot e^{k^3}}{I_{LEDo.к} \cdot e^{k^1} \cdot e^{k^3}} = e^{k^{роз.CO_2}} \quad (2.65)$$

Мультиплікативна компенсація впливних факторів виражена через напругу має вигляд

$$\begin{aligned} Mul &= \frac{U_{вих.р.к}}{U_{вих.о.к}} = \\ &= \frac{I_{LEDp.к} \cdot e^{k^1} \cdot e^{k^2} \cdot e^{k^3} \cdot S_{10p.к} \cdot S_{p.к} \cdot R_{zзp.к}}{I_{LEDo.к} \cdot e^{k^1} \cdot e^{k^3} \cdot S_{10о.к} \cdot S_{о.к} \cdot R_{zзо.к}} = e^{k^2} \end{aligned} \quad (2.66)$$

Виходячи з рівняння 2.66

$$k_{роз.CO_2} = \ln Mul \quad (2.67)$$

Графічна залежність параметрів Add та Mul від концентрації CO<sub>2</sub> у діапазоні від 0 до 10%<sub>об.</sub> представлено на рис. 2.29.

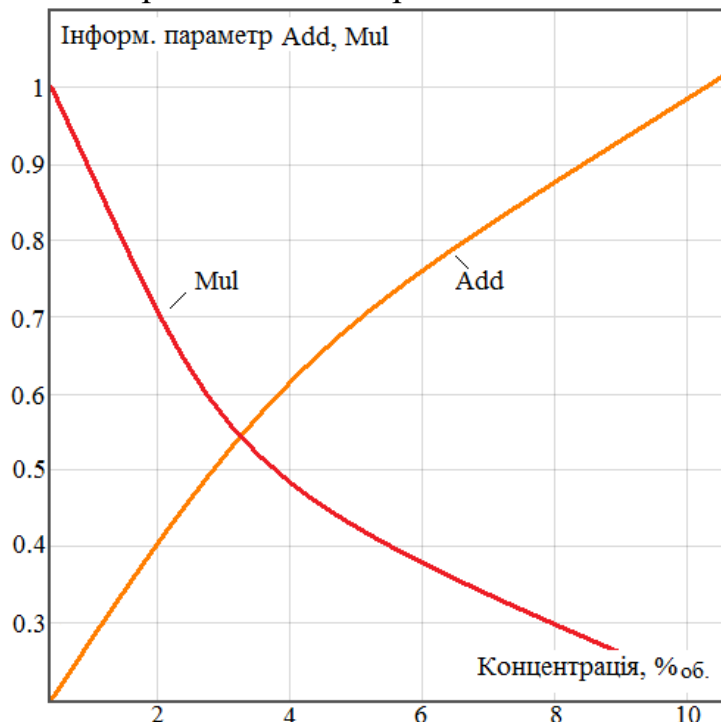


Рис. 2.29. Залежність параметрів Add та Mul від концентрації CO<sub>2</sub>

Моделювання параметрів *Add* та *Mul* від концентрації  $CO_2$  виконано на основі експериментальних даних з кроком 2.5%<sub>об.</sub>. Теоретично моделі 2.60 та 2.61 враховують інтенсивності на виході робочого та опорних каналів, але практично в даних залежностях використовувалась напруга, тобто

$$Add = U_{вих.о.к} - U_{вих.р.к} \Rightarrow Mul = \frac{U_{вих.р.к}}{U_{вих.о.к}} \quad Mul = \frac{U_{вих.р.к}}{U_{вих.о.к}} .$$

Проаналізувавши характеристику на рис. 2.39 зроблено висновок, що при концентрації  $CO_2$  до 3%<sub>об.</sub> оптимальніше використовувати адитивний алгоритм компенсації, а при більше 3%<sub>об.</sub> – мультиплікативний.

## 2.8 Висновки до розділу 2

У даному розділі проведено аналіз фізико-математичних властивостей поглинання газів інфрачервоною радіацією.

Вдосконалена математична модель перенесення випромінювання в середовище димового газу котельних установок, яка, на відміну від існуючих враховує особливості об'єкта контролю, а саме значення тиску в загальному випадку представляється як атмосферний тиск та розрідження, причому у атмосферному тиску враховується висота засобу контролю над рівнем моря, що дозволило підвищити достовірність контролю.

Одержав подальший розвиток метод вимірювального контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок в основній інфрачервоній області та розроблено структурну схему з відкритими вимірювальним та компенсаційним каналами для його здійснення, що дало змогу зменшити кількість контрольованих параметрів (вологість, запиленість), який, на відміну від відомих, відрізняється тим, що значення концентрації двоокису вуглецю отримують на основі співвідношення показників інтенсивностей світлових потоків, які пройшли через відкриті вимірювальний та компенсаційний канали, причому співвідношення показників інтенсивностей світлових потоків враховує як адитивні, так і мультиплікативні коефіцієнти поправок залежно від діапазону вимірювання.

Вдосконалено математичну модель фотоелектричного вимірювального перетворювача інтенсивності світлового потоку, яка враховує паразитні параметри складових елементів фотоприймача, отримано рівняння перетворення, що однозначно пов'язує вихідну величину – значення вихідної напруги фотоприймача та вхідну – значення інтенсивності світового потоку, що дозволило підвищити достовірність контролю.

Проведено аналіз коефіцієнту передачі оптичного вимірювального перетворювача, коефіцієнт поглинання  $CO_2$  у димових газах котельних установок та досліджено вплив ширини спектру приймача ІЧ випромінювання на чутливість оптичного каналу газового сенсора.

Результати досліджень, що приведені в даному розділі опубліковані в таких роботах автора [71, 100, 101, 106, 109, 110, 112].

### **РОЗДІЛ 3**

## **РОЗРОБКА ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ КОНЦЕНТРАЦІЇ ДВООКИСУ ВУГЛЕЦЮ У ДИМОВИХ ГАЗАХ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК ТА ОЦІНЮВАННЯ ЙОГО МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Розроблена структурна та функціональна схеми засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок та оптичного сенсора зокрема. Представлені рекомендації для проектування засобу вимірювального контролю двоокису вуглецю у димових газах котельних установок. Проведене математичне моделювання процесів горіння в котельних установках. Проведено оцінення основних метрологічних характеристик розробленого засобу контролю.

### **3.1 Розробка структурної схеми засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок**

До складу розробленого засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок входять такі основні структурні вузли (рис. 3.1):

- перевірювальна газова суміш;
- джерело випромінювання;
- оптичний вимірювальний перетворювач;
- приймач випромінювання;
- промисловий логічний контролер
- АЦП (вбудований у ПЛК);
- МХ (вбудований у ПЛК);
- персональний комп'ютер;
- сенсор тиску;
- сенсор температури.

За допомогою програмованого логічного контролера (інтегрованими вузлами якого є АЦП та МХ) здійснюється багатоканальне аналогово-цифрове перетворення вимірювальних сигналів. Вимірювальні сигнали уніфіковані та надходять від промислових сенсорів температури і тиску та оптичного вимірювального перетворювача. За допомогою інтерфейсу RS-232 забезпечується обмін даними між ПЛК та персональним комп'ютером з необхідним програмним забезпеченням.

На рис. 3.1 представлено узагальнену структурну схему засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок.

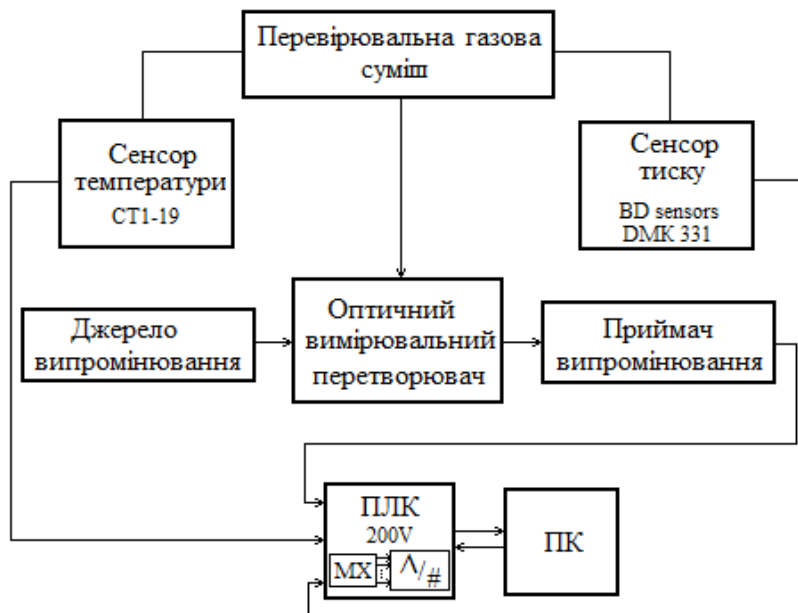


Рис. 3.1. Структурна схема засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок

### 3.2 Розробка функціональної схеми засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок

До функціональних вузлів розробленого засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок відносять (рис. 3.2):

- 1 – корпус засобу контролю складу концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок;
- 2 – корпус оптичного сенсору;
- 3 – газозабірний зонд шланг для закачування/відкачування пробу у/з засобу контролю;
- 4 – фільтр (від механічних домішок) ;
- 5 – вентилятори;
- 6 – сенсор тиску;
- 7 – сенсор температури;
- 8 – СВД робочого каналу;
- 9 – ФД робочого каналу;
- 10 – ФД опорного каналу;
- 11 – СВД опорного каналу;
- 12 – плата;
- 13 – гніздо для роз'ємів;
- 14 – ПЛК з вбудованим АЦП;
- 15 – ПК;
- 16 – перевірювальна газова суміш;
- 17 – нагрівач;
- 18 – охолоджувач;
- 19 – сигналізація.

На рис. 3.2 представлено функціональну схему засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок.

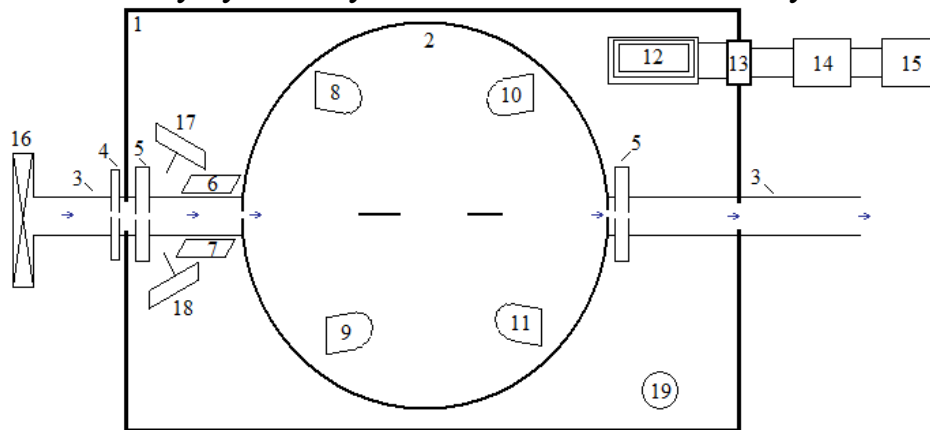


Рис. 3.2. Функціональна схема засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок

Засіб контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок працює таким чином: проба з газом поступає через газозбірний зонд у паралельно розташовані одна до одної робочу та опорну кювети. Паралельно з кількісним контролем концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок відбувається вимірювання сенсорами його температури та тиску розрідження. Сигнали з сенсорів поступають на ПЛК, який, в свою чергу, їх обробляє та значення концентрації у %об. відображається оператору на ПК. Якщо концентрація двоокису вуглецю у димових газах котельних установок лежить за межами уставок – спрацьовує звуковий сигнал. У зв'язку з тим, що даний зразок засобу контролю впроваджено у лабораторний практикум, він додатково оснащений парою охолоджувач-нагрівач для примусової зміни температурних параметрів проби. На лабораторному практикумі газозбірний зонд з'єднано з балоном із перевірювальною газовою сумішшю, в реальних умовах схема підключення зонда представлена на рис. 3.3.

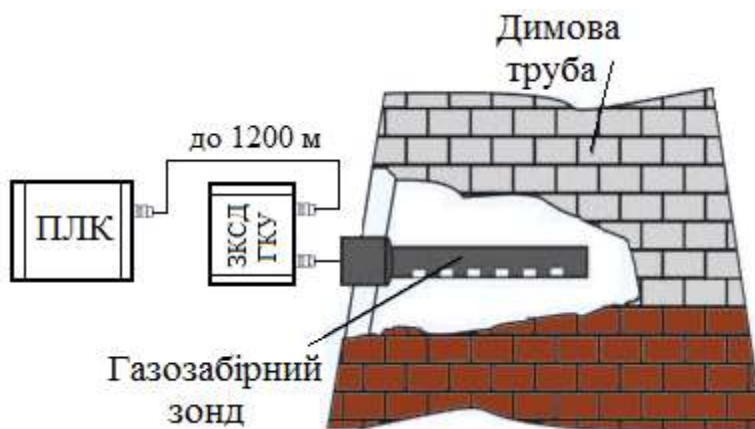


Рис. 3.3. Схема підключення газозбірного зонду

Тобто, газозбірний зонд встановлюється безпосередньо у димову трубу КУ. Корпус засобу контролю виконано із термостійкого пластику.

Як було визначено у першому розділі, за своїми можливостями оптичні методи газового аналізу перевершують використовувані в цьому класі приладів електрохімічні та каталітичні методи, забезпечуючи високі швидкодюю, селективність, стійкість до агресивних середовищ, тривалий термін служби.

В свою чергу, існують різні типи побудови структурно-функціональної організації самих оптичних газових сенсорів.

Традиційно в ІЧ-аналізаторах використовуються сенсори на основі теплових джерел та ширококутових приймачів випромінювання спільно з вузькосмуговими (інтерференційними) фільтрами. Прикладом такої структури є газоаналітичні системи (ГС), побудовані за принципом прямої дії прямої дії [51, 52]. Принцип роботи полягає в наступному – ІЧ випромінювання від джерела поступає в дві розташовані поряд і паралельно один одному кювети – робочу і порівняльну. Через робочу кювету прокачується газ, який аналізується, а порівняльна кювета містить повітря, вільне від цього газу, і утворює канал порівняння (з закритим входом та виходом). Але, недоліком є необхідність підбору порівняльної кювети до різних типів котлоагрегатів, що не уможливило адаптацію засобу контролю складу димових газів котельних установок. Тому реалізація робочого та опорного каналу здійснена за принципом, що обидві кювети мають відкритий вхід та вихід. Структурна схема опорного та робочого оптичних каналів представлена на рис. 3.4.

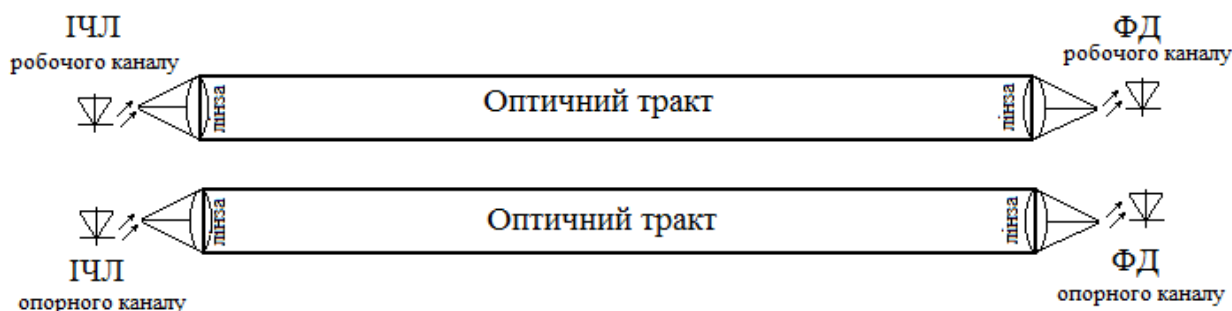


Рис. 3.4. Структурна схема опорного та робочого оптичних каналів

Конструкційно кювети ідентичні, різниця лише в робочих довжинах хвиль пари лазер-фотодіод.

### 3.3 Аналіз шляхів подачі димового газу на засіб контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок

Для підтримки ресурсозбережного режиму роботи КУ необхідно з високою точністю забезпечити оптимального співвідношення «пальне-повітря» у котлі, з мінімально можливим коефіцієнтом надлишку повітря. Для цього з одного боку потрібно в залежності від кількості пального, що поступає, подати необхідну кількість повітря в топку котла, а з другого - із заданою інтенсивністю видаляти з неї продукти згорання. Це можна досягти використовуючи наступну схему керування котлом: інформація з

газоаналізатора (інформація про склад продуктів згорання у топці котла) поступає на ПЛК, який в свою чергу керує потоком та відтоком повітря у топку (з топки) котла у нормованих оптимальних межах. В основі процесу керування лежать представлені моделі матеріального та теплового балансу рідин та газових фракцій котла.

Блок стабілізації вхідних параметрів (БСВП). Проба, що забирається для аналізу газової суміші безпосередньо з димової труби, має велику “розкиданість” параметрів, а саме: температури, вологості, тиску, запиленості. Якщо подавати димовий газ з нестабілізованими параметрами безпосередньо на вимірювальний перетворювач, це призведе до отримання на виході інформацію про склад димового газу з великою похибкою. Тому у структуру ГС пропонується включати БСВП. БСВП повинен відповідати таким вимогам: висока швидкодія, ефективне та надійне очищення від механічних домішок, зменшення до необхідного значення вологості суміші, стабілізація температури та тиску.

Тобто, завдяки введенню у склад ГС БСВП компенсуються вище перераховані впливні фактори. Але існує неоднозначність: при зменшенні статичної складової похибки збільшується динамічна складова (при проходженні проби через БСВП (1)), і навпаки при зменшенні динамічної складової збільшується статична складова (з відкритим оптичним каналом (2)) [43].



Рис. 3.5. Шляхи подачі димового газу на ГС, для його аналізу

Дійсно, похибка в усталеному режимі є статичною похибкою. Наявність перехідного процесу зумовлює динамічну похибку. Тривалість перехідного процесу при заданій динамічній похибці визначають з рівняння [31]

$$\Delta_{дн} = k \cdot e^{-\frac{t_{пп}}{\tau}}, \quad (3.1)$$

де  $t_{пп}$  – тривалість перехідного процесу;  $\tau$  – стала часу;  $\Delta_{дн}$  – динамічна похибка засобу вимірювання;  $k$  – коефіцієнт передачі.

З останнього рівняння тривалість перехідного процесу при заданому значенні динамічної похибки визначається за формулою

$$t_{пп} = \tau \cdot \ln\left(\frac{k}{\Delta_{дн}}\right). \quad (3.2)$$

Таким чином, у засобах вимірювань з аперіодичним перехідним процесом, який описується перехідною першого порядку, динамічна похибка зменшується разом зі зменшенням тривалості перехідного процесу.

Протікання перехідного процесу у ВП після зміни концентрації газової суміші представлено на рис. 3.6. Перехідна характеристика  $h(t)$  побудована в середовищі Scilab. Результати моделювання перехідного процесу з відкритим оптичним каналом представлені у [134], з закритим оптичним каналом у [3] (оптичний газоаналізатор ГІАМ-15М).

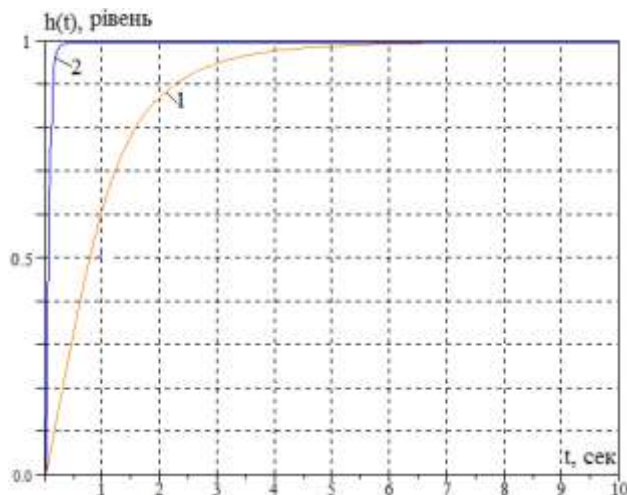


Рис. 3.6. Перехідний процес у ВП з закритим – 1 (відкритим – 2) оптичним каналом

При  $t \approx$  від 0.0 до 3.0 – це час, затрачений на транспортування проби та обумовлений інерційністю елементів ГС. При  $t \approx$  від 0.0 до 0.1 с – це час, обумовлений інерційністю елементів ГС.

Отже, існує проблема  $\Delta_{дн1} > \Delta_{дн2}$ , при  $\Delta_{ст1} < \Delta_{ст2}$ , і навпаки  $\Delta_{дн1} < \Delta_{дн2}$ , при  $\Delta_{ст1} > \Delta_{ст2}$ . Вирішення даної проблеми розпочато у розділі 2 шляхом введення додаткових вимірювальних каналів у засіб контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок і буде продовжена у розділі 3.4 (шляхом інженерно-технічних рішень при розробці структури оптичного сенсора).

### 3.4 Оцінення основних метрологічних характеристик вимірювальних каналів засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок

**Рівняння перетворення вимірювального каналу.** Залежність вихідного коду  $N_x$  від напруги  $U_x$

$$N_x = \frac{U_x}{U_0} \cdot 2^{n-1}, \quad (3.3)$$

де  $U_x$  - значення напруги на виході датчика при заданому  $C$ ;  $N_x$  - значення коду після аналого-цифрового перетворення;  $U_0$  - опорна напруга;  $n$  - розрядність АЦП.

Підставивши рівняння (2.22) у рівняння (3.3) та абсолютне значення опорної напруги отримаємо рівняння вимірювального каналу за напругою



$$N_x = \frac{I_0 \cdot e^{\frac{\int_0^{\infty} k_s(\lambda) d\lambda}{\pi} \cdot \frac{\sigma}{\sigma^2 + (\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_i})^2} \cdot \frac{-0,0083 \cdot T}{P_0 \cdot e^{\frac{M_M \cdot g \cdot h}{R \cdot T} - P_{розр.}}} \cdot \frac{C \cdot l}{M}}}{5.5} \cdot S_{I0} \cdot S \cdot R \cdot 2^{12}. \quad (3.4)$$

Графічна залежність вихідного коду  $N_x$  від концентрації  $C$  представлено на рис. 3.7 – 3.8.

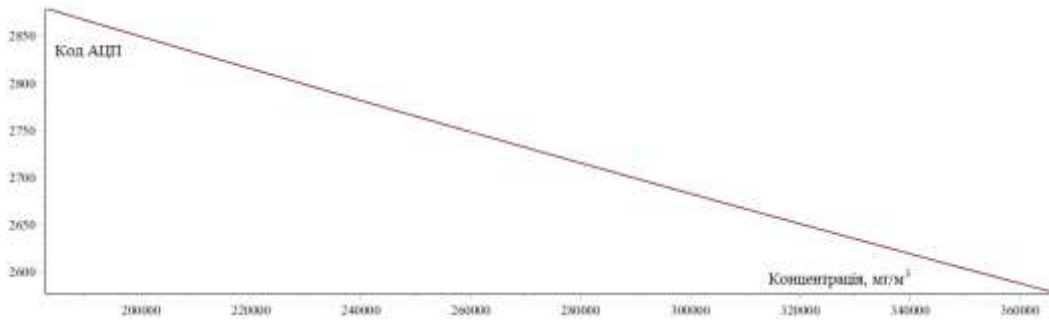


Рис.3.7. Графічне представлення рівняння вимірювального каналу концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок (в робочому діапазоні)

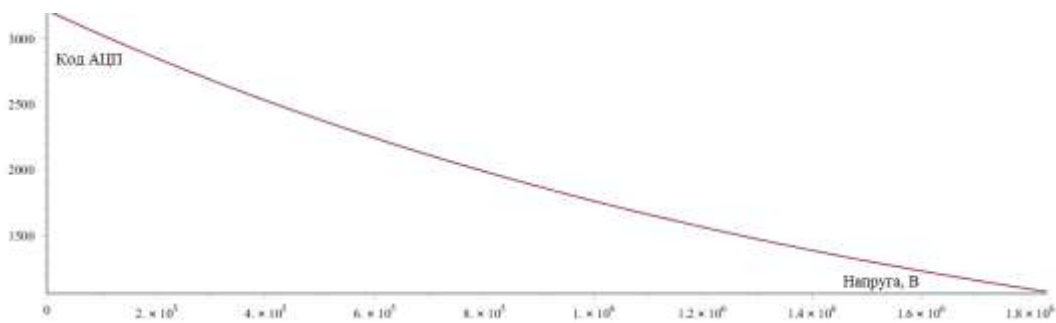


Рис. 3.8. Графічне представлення рівняння вимірювального каналу концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок (в повному діапазоні)

В свою чергу, інтенсивність випромінювання на виході оптичного каналу  $I_x$ , зв'язано з  $U_x$  наступним співвідношенням

$$I_0 = \frac{U_F}{e^{\frac{\int_0^{\infty} k_s(\lambda) d\lambda}{\pi} \cdot \frac{\sigma}{\sigma^2 + (\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_i})^2} \cdot \frac{-0,0083 \cdot T}{P_0 \cdot e^{\frac{M_M \cdot g \cdot h}{R \cdot T} - P_{розр.}}} \cdot \frac{C \cdot l}{M}} \cdot S_{I0} \cdot S \cdot R_{ZZ}}. \quad (3.5)$$

Залежність інтенсивності випромінювання від напруги (в робочому діапазоні 10-20%) представлено на рис. 3.9

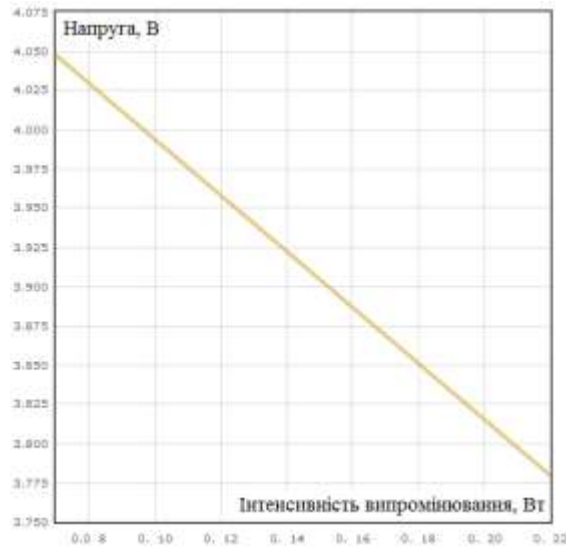


Рис. 3.9. Залежність інтенсивності випромінювання від напруги

Залежність інтенсивності випромінювання від тиску та температури представлено(при сталій концентрації) на рис. 3.10.

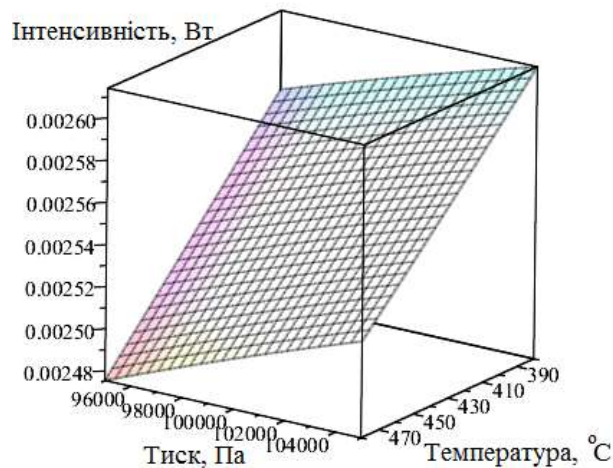
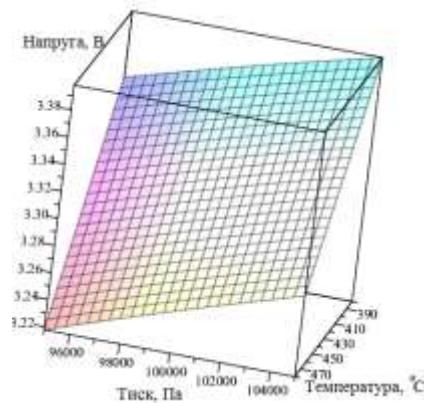


Рис. 3.10. Залежність інтенсивності випромінювання від тиску та температури представлено(при сталій концентрації)

Залежність напруги на виході оптичного сенсора від тиску та температури представлено(при сталій концентрації) на рис. 3.11.



Рису. 3.11. Залежність напруги на виході оптичного сенсора від тиску та температури представлено(при сталій концентрації)

**Розклад функціональної залежності у ряд Тейлора та дослідження основних статичних характеристик.** Математичним апаратом дослідження статичних метрологічних характеристик є використання розкладу функції перетворення в ряд Тейлора [31, 32].

Для оцінювання похибок вимірювального перетворення використано методику, викладену в [184]. Концентрація двоокису вуглецю виражена з математичної моделі вимірювального перетворювача концентрації двоокису вуглецю в димових газах котельних установок:

$$C = \frac{M \cdot \ln \frac{I_0}{U_F \cdot S_{10} \cdot S \cdot R_{ZZ}}}{\int_0^{\infty} k_s(\lambda) d\lambda \cdot \frac{\sigma}{\pi \cdot \left[ \sigma^2 + \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_i} \right)^2 \right] \cdot P_0 \cdot e^{-\frac{M \cdot g \cdot h}{R \cdot T}} - P_{розр.}}} \quad (3.6)$$

Вимірювальні та впливні величини опосередкованого вимірювання представлено на рисунку 3.12

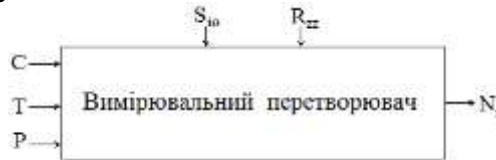


Рис. 3.12. Представлення вимірювального перетворення

Згідно представлення вимірювального перетворення функція перетворення має вигляд:

$$y = N_x = fun(\bar{x}, \bar{f}) = fun(C, T, P, S_{10}, R_{zz}), \quad (3.7)$$

де  $\bar{x} = (C, T, P)$ ,  $\bar{f} = (S_{10}, R_{zz})$ .

Розклавши 3.7 в ряд Тейлора отримаємо 3.9 та 3.9

$$\begin{aligned} y = fun(x_{1n}, x_{2n}, x_{3n}, f_{1n}, f_{2n}) &+ \sum_{i=1}^3 \frac{\partial y}{\partial x_{i_n}} (x_i - x_{in}) + \sum_{i=1}^2 \frac{\partial y}{\partial f_{i_n}} (f_i - f_{in}) + \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 y}{\partial x_i \partial x_j} (x_i - x_{in}) \cdot (x_j - x_{jn}) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \frac{\partial^2 y}{\partial f_i \partial f_j} (f_i - f_{in}) \cdot (f_j - f_{jn}) + \\ &+ \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x_i \partial f_j} (x_i - x_{in}) \cdot (f_j - f_{jn}). \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned}
N_x = & fun(C_n, T_n, P_n, S_{ion}, R_{zzn}) + \frac{\partial N}{\partial C}(C - C_n) + \frac{\partial N_x}{\partial T}(T - T_n) + \frac{\partial N_x}{\partial P}(P - P_n) + \\
& + \frac{\partial N_x}{\partial S_{io}}(S_{io} - S_{ion}) + \frac{\partial N_x}{\partial R_{zz}}(R_{zz} - R_{zzn}) + \\
& + \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{\partial^2 N_x}{\partial C^2} \cdot (C - C_n)^2 + 2 \frac{\partial^2 N_x}{\partial C \partial T} (C - C_n)(T - T_n) + 2 \frac{\partial^2 N_x}{\partial C \partial P} (C - C_n)(P - P_n) + \right. \\
& \left. 2 \frac{\partial^2 N_x}{\partial T^2} (T - T_n)^2 + \frac{\partial^2 N_x}{\partial T \partial P} (T - T_n)(P - P_n) + \frac{\partial^2 N_x}{\partial P^2} (P - P_n)^2 \right] + \\
& + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2 N_x}{\partial S_{io}^2} (S_{io} - S_{ion})^2 + \frac{\partial^2 N_x}{\partial R_{zz}^2} (R_{zz} - R_{zzn}) + 2 \frac{\partial^2 N_x}{\partial S_{io} \partial R_{zz}} (S_{io} - S_{ion})(R_{zz} - R_{zzn}) \right] + \\
& + \frac{\partial^2 N_x}{\partial C \partial S_{io}} (C - C_n)(S_{io} - S_{ion}) + \frac{\partial^2 N_x}{\partial C \partial R_{zz}} (C - C_n)(R_{zz} - R_{zzn}) + \\
& + \frac{\partial^2 N_x}{\partial C \partial S_{io}} (T - T_n)(S_{io} - S_{ion}) + \frac{\partial^2 N_x}{\partial T \partial R_{zz}} (T - T_n)(R_{zz} - R_{zzn})
\end{aligned} \tag{3.9}$$

де 1.  $\frac{\partial N}{\partial C}(C - C_n) + \frac{\partial N_x}{\partial T}(T - T_n) + \frac{\partial N_x}{\partial P}(P - P_n)$  – сума номінальних коефіцієнтів перетворення або чутливість ВП;

$$2. \left[ \frac{\partial^2 N_x}{\partial C^2} \cdot (C - C_n)^2 + 2 \frac{\partial^2 N_x}{\partial C \partial T} (C - C_n)(T - T_n) + 2 \frac{\partial^2 N_x}{\partial C \partial P} (C - C_n)(P - P_n) + \right. \\
\left. 2 \frac{\partial^2 N_x}{\partial T^2} (T - T_n)^2 + \frac{\partial^2 N_x}{\partial T \partial P} (T - T_n)(P - P_n) + \frac{\partial^2 N_x}{\partial P^2} (P - P_n)^2 \right] - \text{сума}$$

змін чутливості в діапазоні перетворень;

$$3. \left[ \frac{\partial^2 N_x}{\partial S_{io}^2} (S_{io} - S_{ion})^2 + \frac{\partial^2 N_x}{\partial R_{zz}^2} (R_{zz} - R_{zzn}) + 2 \frac{\partial^2 N_x}{\partial S_{io} \partial R_{zz}} (S_{io} - S_{ion})(R_{zz} - R_{zzn}) \right] - \text{вплив}$$

впливних величин на вихідний параметр  $N_x$ .

Моделювання номінальної функції перетворення, абсолютної похибки нелінійності, відносної похибки нелінійності, абсолютної мультиплікативної похибки, абсолютної адитивної похибки представлено на рис. 3.13-3.17. Математичні розрахунки представлено у додатку М.

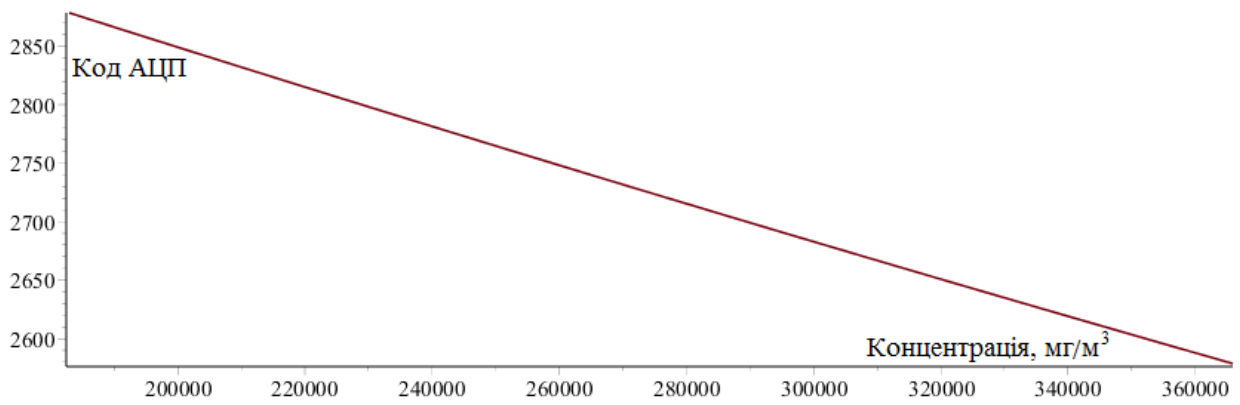


Рис. 3.13. Представлення номінальної функції перетворення

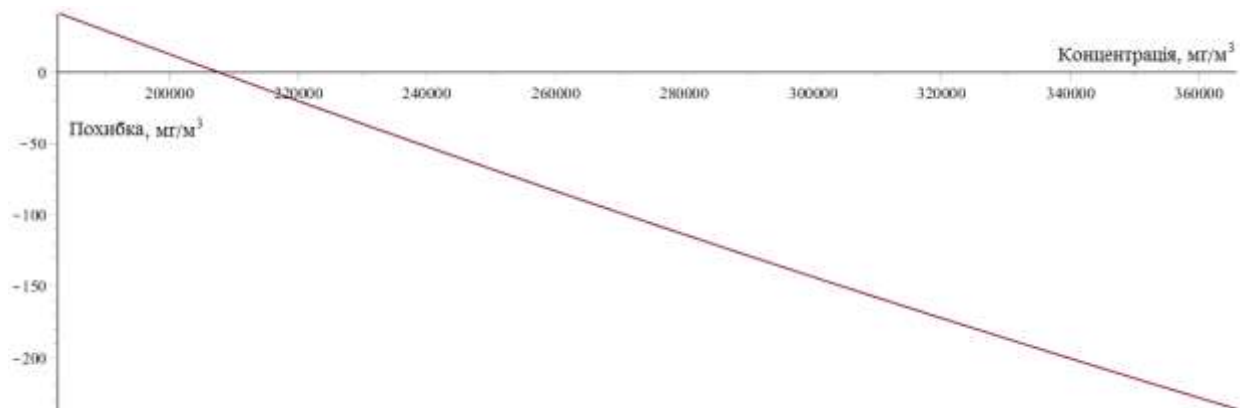


Рис. 3.14. Представлення абсолютної похибки нелінійності

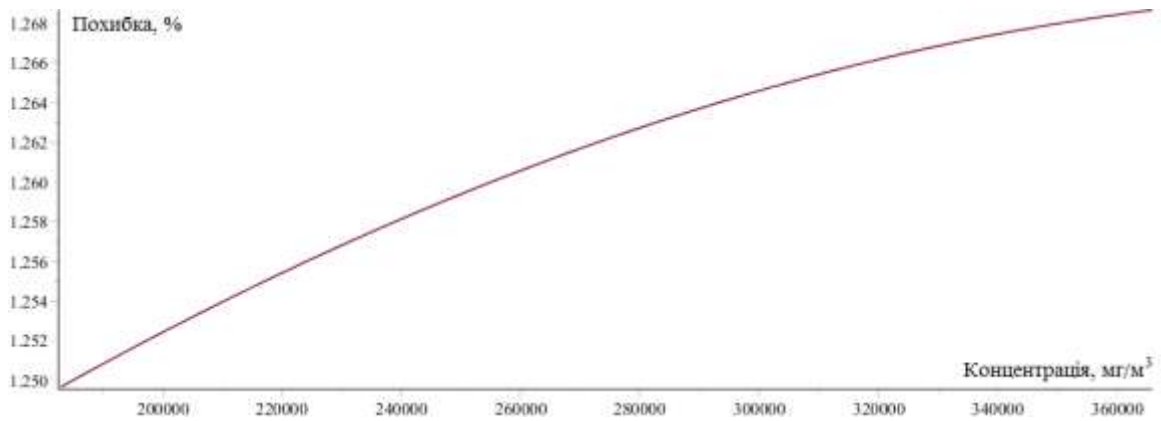


Рис. 3.15. Представлення відносної похибки нелінійності номінальної функції перетворення

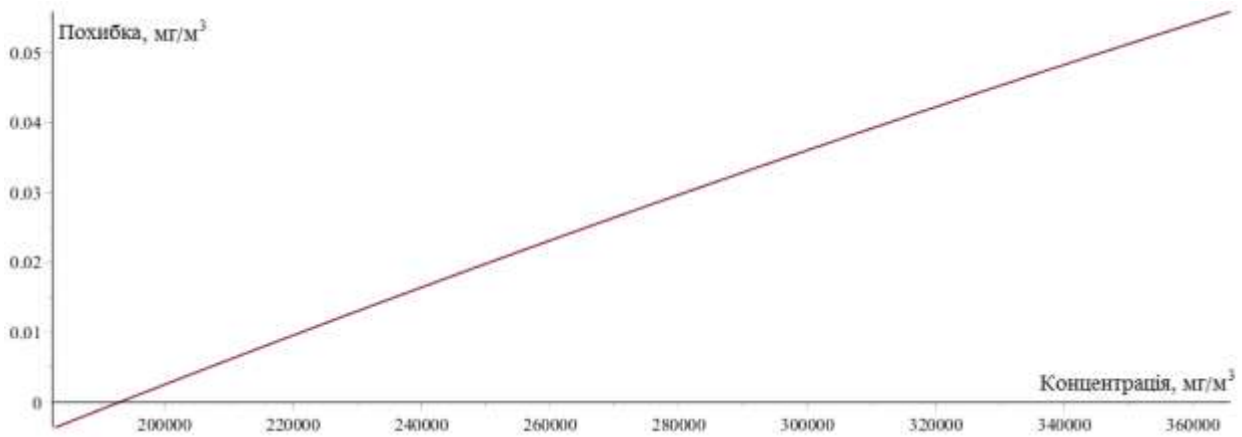


Рис. 3.16. Представлення абсолютної мультиплікативної похибки

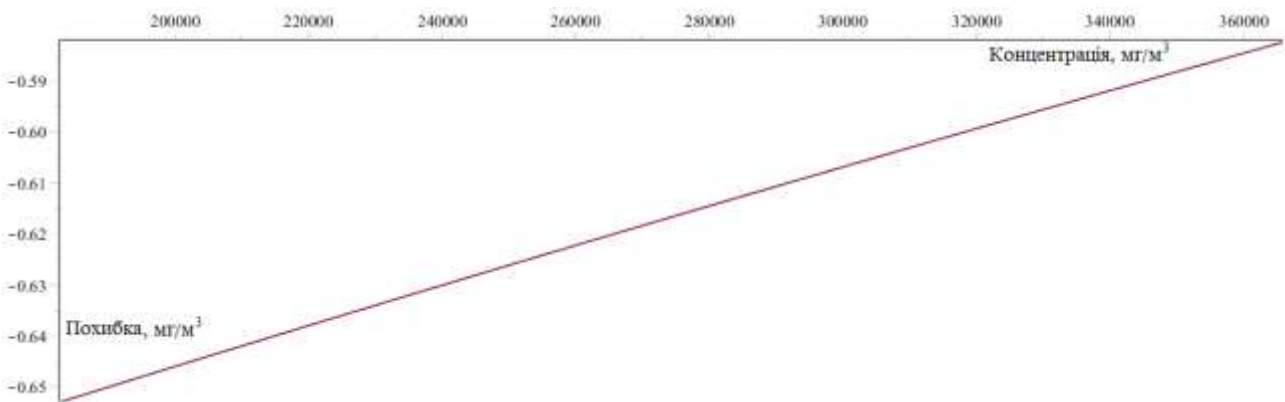


Рис. 3.17. Представлення абсолютної адитивної похибки

Максимальна похибка квантування (в реальних умовах похибка квантування буде значно менше, так як максимально адекватний код АЦП не більше 3200).

$$\sigma_{кв} = \frac{1}{N_x} \cdot 100\% = 0.12\%. \quad (3.10)$$

Залежність похибки квантування від концентрації представлено на рис. 3.18. – 3.19.

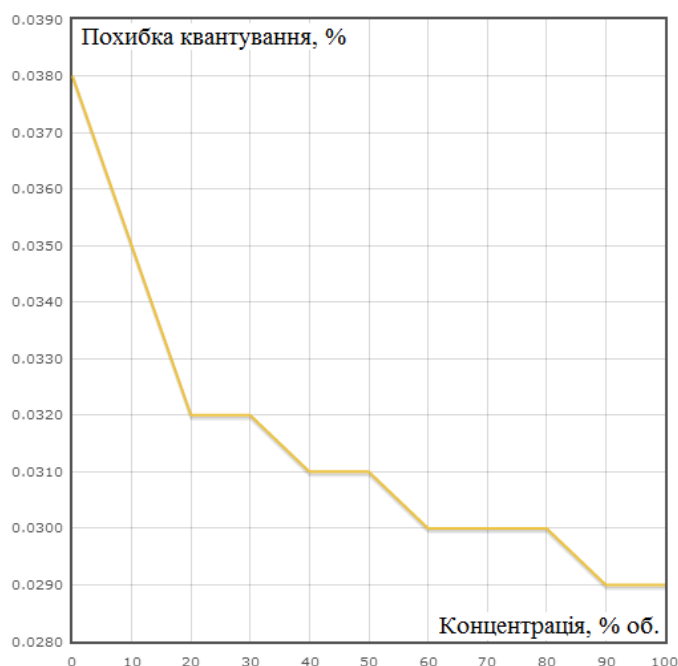


Рис. 3.18. Залежність похибки квантування від концентрації CO<sub>2</sub>

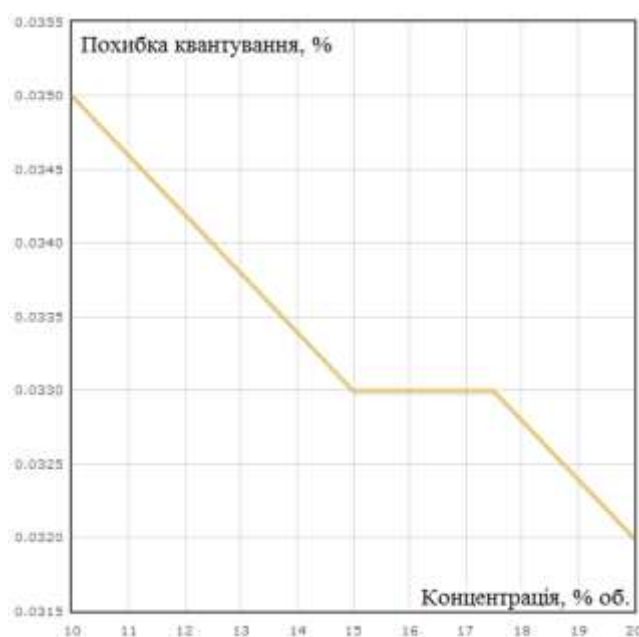


Рис. 3.19. Залежність похибки квантування від концентрації CO<sub>2</sub> (в робочому діапазоні)

Дослідження перехідного процесу. Динамічну похибку представляють через динамічні характеристики і визначають як миттєву різницю значення вхідного сигналу, розрахованого за вхідним сигналом і значенням номінальної статичної характеристики, і миттєвого значення сигналу у даний момент часу [31, 32]. Найхарактернішими для засобів вимірювань є динамічні характеристики, які описуються диференціальними рівняннями першого порядку. Узагальнене рівняння, яке характеризує аперіодичну ланку має вигляд

$$\tau \cdot \frac{dy}{dt} + y = k \cdot x, \quad (3.11)$$

де  $k$  – коефіцієнт передачі;  $\tau$  – стала часу, що визначається параметрами засобу вимірювань;  $x(t)$  – вхідна величина засобу вимірювання;  $y(t)$  – вихідна величина засобу вимірювання.

Інерційні властивості характеризуються постійною часу. Знаючи  $\tau$ , досить легко визначити і час, необхідний для наближення перехідного процесу до статичного режиму для будь-якої заданої точності.

Похибка в усталеному режимі є статичною похибкою. Наявність перехідного процесу зумовлює динамічну похибку. Тривалість перехідного процесу при заданій (допустимій) динамічній похибці визначають з рівняння

$$\Delta_{DH} = k \cdot e^{-\left(\frac{t_{III}}{\tau}\right)}, \quad (3.12)$$

де  $t_{III}$  – тривалість перехідного процесу.

З останнього рівняння тривалість перехідного процесу при заданому значенні динамічної похибки визначається за формулою

$$t_{III} = \tau \cdot \ln\left(\frac{k}{\Delta_{DH}}\right). \quad (3.13)$$

Таким чином, у засобах вимірювань з аперіодичним перехідним процесом, який описується перехідною першого порядку, тривалість перехідного процесу зменшується при зменшенні сталої  $\tau$  і при збільшенні допустимої динамічної похибки.

Прийmemo вихідну величину  $U(T)$  як одиничну функцію (функцію Хевісайда) та отримаємо аналітичну залежність для перехідної характеристики аперіодичної ланки

$$U(T) = k \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (3.14)$$

де  $k$  – коефіцієнт передачі;  $\tau$  – стала часу, що визначається параметрами засобу вимірювання.

Одержані результати моделювання реакції датчиків засобу контролю на вхідний сигнал  $I(t)$ , представлені на рис. 3.15-3.17. Перехідна характеристика  $h(t)$  побудована експериментальним шляхом за допомогою імпульсного таймеру у пакету WinPLC7 (модель для дослідження перехідного процесу представлено на рис. 3.20).

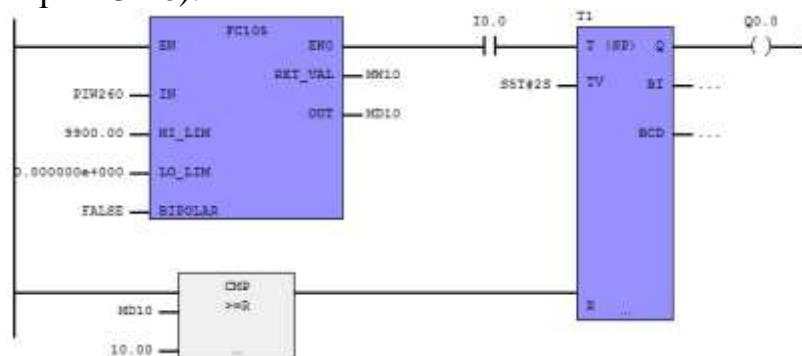


Рис. 3.20. Модель для дослідження перехідного процесу



Протікання перехідного процесу у ВП після зміни концентрації газової суміші (побудовано у пакеті Scilab) на основі експериментальних даних представлено на рис. 3.21:

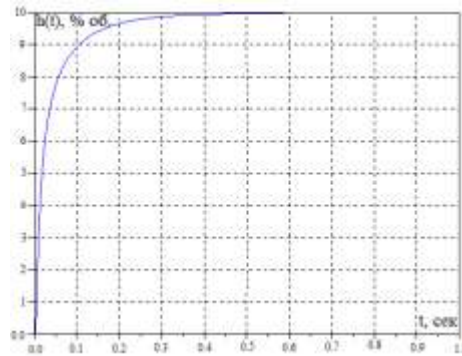


Рис. 3.21. Перехідний процес у вимірювальному каналі CO<sub>2</sub>

Протікання перехідного процесу у ВП після зміни температури представлено на рис. 3.22:

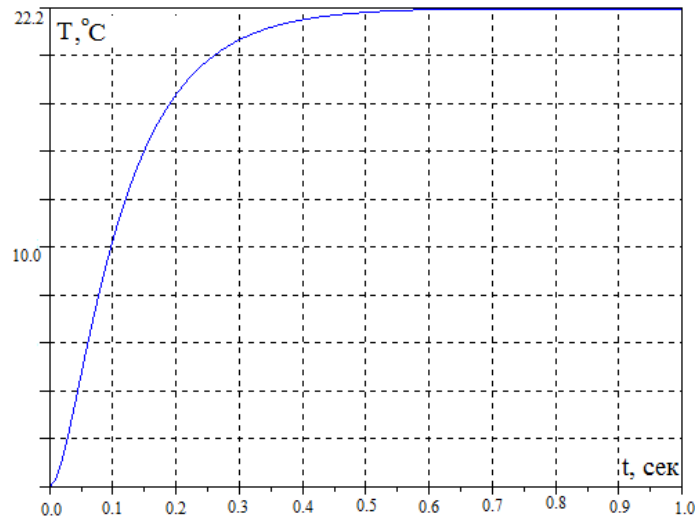


Рис. 3.22. Перехідний процес у вимірювальному каналі температури

Протікання перехідного процесу у ВП після зміни тиску представлено на рис. 3.23:

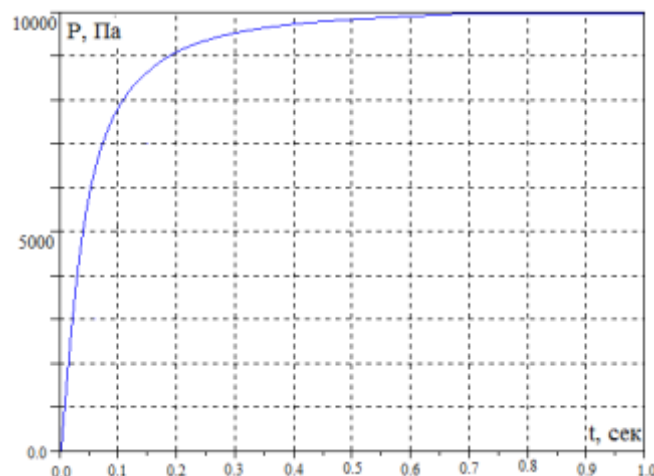


Рис. 3.23. Перехідний процес у вимірювальному каналі тиску

При  $t \approx$  від 0 до 0.1 с – час від моменту зміни концентрації димового газу на вході до моменту досягнення вихідним сигналом певного рівня. Це час транспортування проби та інерційність елементів.

При  $t \approx$  від 0.1 до 0.35 с – час по закінченню якого миттєве значення вихідного сигналу буде пропорційне значенню зміни концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок. Час залежить від динамічних процесів газової суміші, що аналізується.

З рис. 3.21 можна зробити висновок, що поставлену проблему в підрозділі 3.3 ( $\Delta_{дн1} > \Delta_{дн2}$ , при  $\Delta_{ст1} < \Delta_{ст2}$ , і навпаки  $\Delta_{дн1} < \Delta_{дн2}$ , при  $\Delta_{ст1} > \Delta_{ст2}$ ) – вирішено. Порівнюючи одержані дані з даними на рис.3.6 видно, що час обробки миттєвого сигналу збільшився до  $\approx 0.44$  с (в порівнянні з відкритим оптичним каналом) і зменшився на  $\approx 6$  с (в порівнянні з закритим оптичним каналом). Отриманні результати повністю відповідають вимогам ГОСТ Р 50759-95 (пункт 9.3) і можна стверджувати, що поставлену мету (при необхідній швидкодії) – виконано.

### 3.5 Аналіз та оцінення похибок вимірювань

Для розробленого засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок врахуємо такі складові загальної похибки: інструментальна та методична складова. Для повного метрологічного аналізу засобу контролю оцінимо кожен з них.

Інструментальна похибка виникає у вимірювальних каналах (оптичному, температури, тиску, вологості) за місцем їх виникнення. Основними складовими інструментальної похибки в розробленому засобі контролю, є:

- джерело випромінювання (в розробленому засобі лазерний діод), яке встановлюється на відповідну довжину хвилі із певною похибкою  $\Delta_{\text{Джер. випром.}}$ , яка

зумовлюється якістю його виготовлення. Величина цієї похибки визначається виробником та вказується у DataSheet.

- похибку перетворення приймача випромінювання  $\Delta_{\text{Прийм. випром.}}$ . Ця складова похибки є невід'ємною у спектральних приладах і має вагомий внесок у сумарну похибку.

- похибки, що виникають у оптичному вимірювальному перетворювачі. Однією з основних є якість покриття внутрішньої поверхні оптичного перетворювача  $\Delta_{\text{Мат. опти. тракту}}$ . До складу цієї похибки також може входити похибка,

викликана зміною кута відбивання і довжини шляху пучка випромінювання через шорховатості на нанесеному покритті.

- похибки додаткових вимірювальних каналів температури та тиску  $\Delta_{\text{Дод. каналів}}$ , значення яких мають вплив на покази засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок.

- похибка АЦП  $\Delta_{АЦП}$ . Головною складовою похибки АЦП є похибка квантування, іншими похибками, у порівнянні з нею, можна знехтувати. Похибка квантування досліджувалась у 3.21.

Отже, загальна інструментальна похибка буде мати вигляд:

$$\bar{\Delta} = \sqrt{\Delta_{\text{джер. випром.}}^2 + \Delta_{\text{каналів Дод.}}^2 + \Delta_{\text{випром. Прийм.}}^2 + \Delta_{\text{АЦП}}^2 + \Delta_{\text{онт.тракту. Мат.}}^2} \quad (3.15)$$

Підставивши орієнтовні значення похибок, які взяті із DataSheet структурних блоків засобу контролю та розрахунків, отримуємо значення оцінки інструментальної похибки на рівні 1%.

Методичні похибки виникають через недосконалість методу вимірювання (не залежать від якості виготовлення засобу контролю) та наближень, що допускаються при проектуванні засобу контролю. Основною складовою методичної похибки є використання відносного методу вимірювання. До основних методичних похибок віднесемо:

- похибка  $\Delta_{\text{Фун. перет.}}$  вимірювального перетворення математичної моделі

(2.29). В робочому діапазоні максимальне відхилення складає 0.3%.

- похибка адитивності  $\Delta_{\text{адит.}}$ . Ця загальна похибка містить в собі похибку вибору характеристичної довжини хвилі, на якій буде проводитись вимірювання (оцінюється в залежності від вигляду спектру поглинання вибраного газу); похибку, яка виникає через неврахування при розрахунках доплерівського розширення спектральних ліній поглинання досліджуваного газу (розраховується із використанням значення коефіцієнту поглинання випромінювання, яке враховує ефект Доплера – формула); похибка, що з'являється внаслідок відхилення від закону Бугера-Ламберта-Бера, який лежить в основі методу абсорбційної спектроскопії; похибку, що виникає через виключення із розрахунків показника розсіювання випромінювання (пов'язана з явищем флуоресценції молекул газу, а також зменшується довжина шляху пучка випромінювання в оптичному первинному перетворювачі);

- похибка вимірювального перетворення  $\bar{\Delta}_{\text{в.п.}}^2$ . Визначає розбіжність теоретичної та експериментальної моделі (є на рівні 0.27%)

Таким чином, загальна методична похибка:

$$\bar{\Delta} = \sqrt{\Delta_{\text{перет. Фун.}}^2 + \Delta_{\text{ефект адит.}}^2 + \Delta_{\text{перетер. Вимір.}}^2} \quad (3.16)$$

Підставивши відповідні значення похибок, отримуємо значення методичної похибки – 0,9 %.

$$\bar{\Delta}_{\text{заг.}} = \bar{\Delta}_{\text{інструм.}} + \bar{\Delta}_{\text{метод.}} \quad (3.17)$$

Загальна похибка вимірювань дорівнює сумі інструментальних і методичних похибок і складає 1,9 %.

### 3.6 Адаптація засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок

У [166] розглядається підхід для адаптації складних об'єктів. Пропонується загальну задачу адаптації розділяти на дві: "внутрішню" та "зовнішню" адаптації. Корелюючи даний підхід до задач роботи приймемо, що факторами "внутрішньої" адаптації є зміна впливних величин (тиск, температура, вологість, запиленість, концентрація  $\text{CO}_2\text{-O}_2$ ), а при "зовнішній" сам об'єкт (тобто тип або модель котла, на якому проводиться робота).

Отже, представимо узагальнену структурну модель "внутрішньої" адаптації (без зміни об'єкта) на рис. 3.24

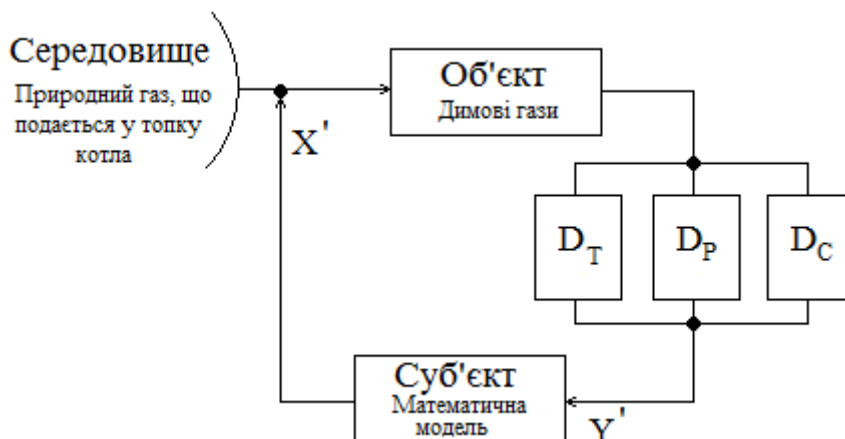


Рис. 3.24. Модель адаптації (без зміни об'єкта)

На рис. 3.24 система сенсорів  $D_T$ ,  $D_P$ ,  $D_C$  сприймає інформативні параметри об'єкта. Інформація ( $X'$ ,  $Y'$ ) утворює сенсорне середовище суб'єкта, а саме ту частину, яку він здатний сприйняти своїми сенсорами. При відхиленні будь-яких параметрів від умовної норми відбувається підлаштування моделі (в нашому випадку 2.22). Слід зазначити, що дане підлаштування присутнє на кожному кроці контролю, причому вихідною інформацією для нього є неузгодженість відгуків об'єкта і моделі, усунення якої і реалізує процес адаптації. Зрозуміло, що на реальних об'єктах цей процес є неперервним у часі.

На рис 3.25 розглянемо узагальнену структурну модель зовнішньої адаптації (при зміні об'єкту).



Рис. 3.25. Модель адаптації (при зміні об'єкта)

Відразу зазначимо з якими типами КУ можлива "зовнішня" адаптація і, як наслідок, адаптація вцілому (рис. 3.26)

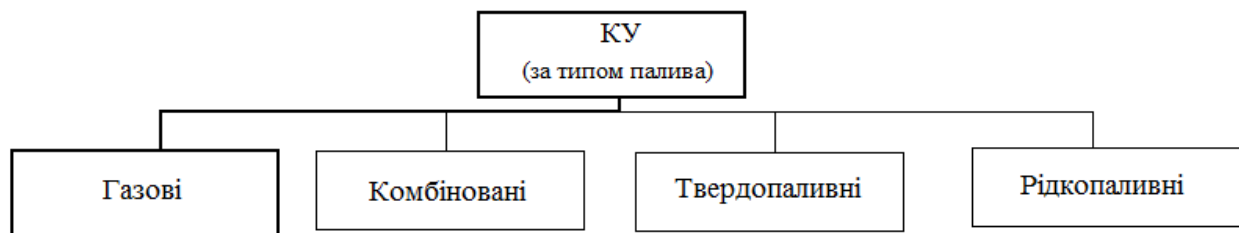


Рис. 3.26. Класифікація КУ за типом палива

З рис. 3.26 видно, що засіб контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок сумісний з усіма типами КУ установок, що працюють на природному газу. Також засіб контролю є сумісний з іншими класифікаційними ознаками газових КУ, а саме: за типом котлів (парові, водогрійні, змішані, діатермічні); за призначенням теплового навантаження (опалювальні, виробничі, змішані); за типом розташування.

Зрозуміло, що необхідно знайти такі параметри “зовнішньої” адаптації, регуляція яких дозволяла вирішити поставлені задачі. В якості таких параметрів використано концентрацію кисню у димових газах та тип котла і відповідно КНП, який є головним показником ефективності роботи котла.

Основні типи котлів та їх оптимальних КНП представлено на рис. 3.27.

	Значение	Адрес	Тип	Симв. - Коментарий
1	1.25	MW 10	INT	DE-25-14GM
2	1.20	MW 11	INT	RD-10-249-98
3	1.09	MW 12	INT	PB-10-574-03
4	1.17	MW 13	INT	E-500-13
5	1.15	MW 14	INT	TGME-464
6	1.11	MW 15	INT	KE-10-14
7	1.07	MW 16	INT	PT-65/75-130/13
8	1.10	MW 17	INT	PTVM-100
...				

Рис. 3.27. Основні типи котлів та їх оптимальних КНП

Дані з рис. 3.27 занесено у програмне забезпечення (розділ 4). Зовнішня адаптація розпочинається з вибору типу котла, на якому проводиться контроль концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок. Відповідно від цього вибору автоматично визначається оптимальний КНП. Слід зазначити, що “зовнішня” адаптація на відміну від “внутрішньої” є однокроковою.

Загальна задача адаптації втрачає будь-який зміст, якщо невідомі параметри середовища (в нашому випадку параметри природного газу, який подається у топку котла). Класичним вирішенням даної проблеми є введення необхідних сенсорів для контролю якісних показників цього середовища (якість природного газу). Якість природного газу – це відповідність значень його фізико-хімічних показників встановленим нормативними документами. Згідно з міждержавним ГОСТ 5542-87 за фізико-хімічними показниками природні горючі гази повинні відповідати вимогам та нормам, що наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

## Фізико-хімічні показники природного газу

Найменування показника	Норма	Метод випробування
Теплота згоряння нижча, МДж/м <sup>3</sup> (ккал/м <sup>3</sup> ), при 20°C 101,325 кПа, не менше	31,8 (7600)	ГОСТ 27193-86 ГОСТ 22667-82 ГОСТ 10062-75
Область значень числа Воббе (вищого), МДж/м <sup>3</sup> (ккал/м <sup>3</sup> )	41,2-54,5 (9850-13000)	ГОСТ 22667-82
Допустиме відхилення числа Воббе від номінального значення,%, не більше	5	-
Об'ємна частка кисню,%, не більше	0,02	ГОСТ 22387.2-83
Масова концентрація меркаптанової сірки, г /м <sup>3</sup> , не більше	0,036	ГОСТ 22387.2-83 ГОСТ 22387.3-77
Об'ємна частка кисню,%, не більше	1,0	ГОСТ 23781-83
Маса механічних домішок в 1 м <sup>3</sup> , г, не більше	0,001	ГОСТ 22387.4-77
Інтенсивність запаху газу при об'ємній частці 1% в повітрі, бал, не менше	3	ГОСТ 22387.5-77

Подавши запит до НАК «НАФТОГАЗ» було отримано відповідь, що показники з табл. 3.1 контролюються на декількох етапах поступання природного газу безпосередньо до КУ. Визначення якісних показників природного газу, що надходить в Україну, тобто визначення відповідності його фізико-хімічних показників (ФХП) тим, що обумовлені контрактами, здійснюється на газовимірювальних станціях та пунктах вимірювання витрати газу (ГВС та ПВВГ), які розташовані на вході магістральних газопроводів в Україну. ГВС та ПВВГ обладнані сучасними основними і дублюючими автоматизованими комплексами обліку газу з фіскальним енергонезалежним архівом кількості та компонентного складу газу, а також втручань. Визначення ФХП газу, що надходить на територію України, проводиться щодобово в хіміко-аналітичних лабораторіях та за допомогою потокових хроматографів, встановлених на ГВС.

Перевірка якості газу, що надходить з газотранспортної системи до газорозподільних мереж проводиться один раз на тиждень. Результати аналізу ФХП газу оформлюються у вигляді протоколу якості газу, який затверджується керівником лінійно-виробничого управління ДК «Укртрансгаз», один

екземпляр якого надається підприємствам, що здійснюють експлуатацію газорозподільних мереж.

За результатами аналізів теплота згоряння нижча (калорійність) природного газу на території України змінюється в межах 8 000-8250 ккал/м<sup>3</sup>, що перевищує значення калорійності газу, встановлені ГОСТ 5542-87 - не нижче 7600 ккал/м<sup>3</sup>. Тому середньоочікувані концентрації і склад димових газів знаходяться в допустимих межах (табл. 1.1) і відповідно задачу адаптації можна вважати виконаною.

### **3.7 Висновки до розділу 3**

У третьому розділі монографії розроблено структурну та функціональну схеми засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок та представлено рівняння перетворення вимірювального каналу.

Розраховано статичні та динамічні характеристики засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок.

Розроблено алгоритмічну організацію адаптації засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок до реальних умов експлуатації, яка враховує не лише зовнішні збудження а і тип котлоагрегата.

Проведено аналіз методів фільтрації вимірюваної концентрації димових газів, який дав змогу уникнути отримання значень похідних, рівних  $\pm\infty$  при збереженні загальної динаміки процесу.

Оцінено можливі значення інструментальних та методичних похибок вимірювань концентрації газів за допомогою розробленого засобу. Встановлено, що загальна похибка вимірювань не перевищує 1,9 %.

Результати досліджень, що приведені в даному розділі, опубліковані в таких роботах автора [6, 7, 10, 11, 43].

## РОЗДІЛ 4

### ВИЗНАЧЕННЯ ВІРОГІДНОСТІ КОНТРОЛЮ ТА ДОСТОВІРНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 4.1 Програмна реалізація засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок

Апаратне забезпечення. Для реалізації поставленої задачі використаємо ПЛК VIPA серії System 200V [30]. Модулі System 200V можна застосовувати для розширення систем автоматизації, виконаних на базі даних контролерів фірми Siemens і промислової шини PROFIBUS, користуючись при цьому єдиним інструментом розробки. Серія System 200V побудована по модульному принципу. Це означає, що користувач має можливість оптимально підбирати состав модулів для рішення свого завдання й гнучко модифікувати його при розширенні або при зміні вимог до засобів. Всі модулі введення-виведення та інтерфейсні модулі мають властивість універсальності, тобто їх можна застосовувати разом з будь-яким CPU даної серії.

Програмне забезпечення. Для реалізації поставленої задачі використаємо програмний пакет WINPLC7 для конфігурування, програмування, наладки програм та діагностики контролерів VIPA всіх серій. WINPLC7 містить всі необхідні інструменти для створення проекту: конфігуратор апаратних засобів, символний редактор, конфігуратор мережі PROFIBUS, редактор програм, емулятор контролера.

Це програмне забезпечення може використовуватися для рішення широкого кола задач автоматизації [37]. Пакет містить вбудований Hardware configuration – додаток для зв'язку мікроконтролером та комп'ютером.

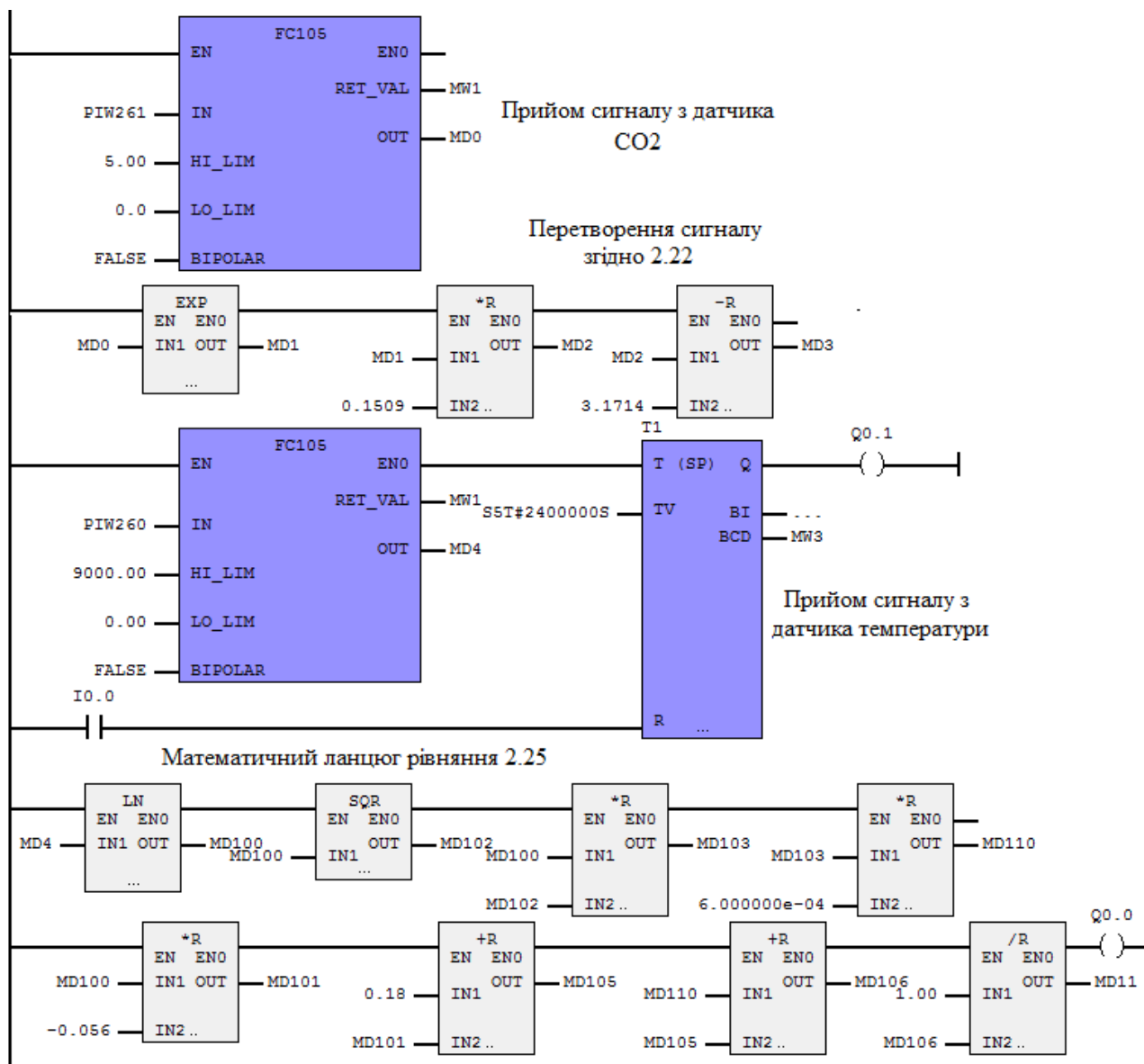
Розробка алгоритму та програми. Програму напишемо у програмному пакеті WINPLC7 на мові програмування Statement List (STL). Алгоритм роботи програми наступний: з засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок надходить змінний електричний інформаційний сигнал про склад димового газу. Цей сигнал прийматиме функціональний блок FC105 (Scaling analog value) та перетворювати його у змінну типу 'real' (MDx). MDx – відповідає значенню електричного сигналу (напрузі), яка лежить в межах 0-5 В. Далі здійснюється перетворення електричного сигналу у відповідну йому концентрацію вуглекислого газу. Концентрація кисню розраховується аналітично. Перетворення здійснюється відповідно математичної моделі, яка представлена у розділі 2 (рівняння 2.16). Після одержання значення про кількість конкретного газу його порівнюють з уставками, що наведені у першому розділі (табл. 1.2). Якщо концентрація лежить у допустимих межах, то частотні регулятори продовжують працювати у тому ж режимі на понижених обертах. Якщо концентрація виходить за рамки уставок подається сигнал на контакт, який відповідає за частоту обертання



двигунів, які подають повітря у топку котла. Процес контролю та керування відбувається в режимі реального часу. Лістинг програми представлено у додатку В.

Розроблений програмний комплекс контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок [113] з основними підпрограмами представлена на рис. 4.1.

Приклад роботи програми по першому каналу при подачі на ПЛК нульового електричного сигналу для перевірки роботи алгоритму та програми наведено на рис. 4.2.



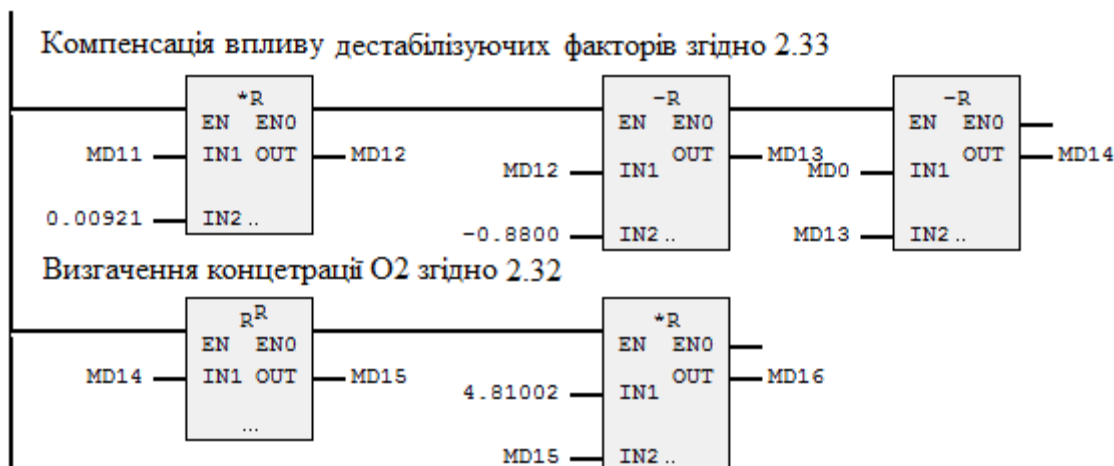


Рис. 4.1. Програмний комплекс CFG

STL	FBD	LAD	RLO/IN	STA/OUT	Address	Value
0:	•	CALL FC105	-	-		
1:	•	IN:=PIW768	0	0		
2:	•	HI_LIM:=20.00	-	-		
3:	•	LO_LIM:=0.00	-	-		
4:	•	BIPOLAR:=FALSE	-	-		
5:	•	RET_VAL:=MWO	0	0		
6:	•	OUT:=MDO	0000 0000	0000 0000		
7:	•	A BR	1	1	0	1 0000 0111
8:	•	JNB _001	1	1	0	1 0000 0110
9:	•	L MD 0	1	1	0	1 0000 0110
10:	•	L MD 1	1	1	0	1 0000 0110
11:	•	+R	1	1	0	1 0000 0110
12:	•	T MD 2	1	1	0	1 0000 0110
13:	•	AN OV	1	0	0	1 0000 0011
14:	•	SAVE	1	0	0	1 0000 0011
15:	•	CLR	0	0	0	1 0000 0000
16:	•	_001 :A BR	1	1	0	1 0000 0111
17:	•	JNB _002	1	1	0	1 0000 0110
18:	•	L MD 1	1	1	0	1 0000 0110
19:	•	L 2.718	1	1	1076753334	1 0000 0110
20:	•	*R	1	1	0	1 0000 0110
21:	•	T MD 3	1	1	0	1 0000 0110
22:	•	AN OV	1	0	0	1 0000 0011
23:	•	SAVE	1	0	0	1 0000 0011
24:	•	CLR	0	0	0	1 0000 0000
25:	•	_002 :A BR	1	1	0	1 0000 0111
26:	•	JNB _003	1	1	0	1 0000 0110
27:	•	L MD 3	1	1	0	1 0000 0110
28:	•	L MD 4	1	1	0	1 0000 0110
29:	•	*R	1	1	0	1 0000 0110
30:	•	T MD 5	1	1	0	1 0000 0110
31:	•	AN OV	1	0	0	1 0000 0011
32:	•	SAVE	1	0	0	1 0000 0011
33:	•	CLR	0	0	0	1 0000 0000
34:	•	_003 :A BR	1	1	0	1 0000 0111
35:	•	JNB _004	1	1	0	1 0000 0110
36:	•	L MD 5	1	1	0	1 0000 0110
37:	•	L MD 2	1	1	0	1 0000 0110
38:	•	/R	1	1	2139095040	1 1111 0110
39:	•	T MD 6	+INF	+INF	2139095040	1 1111 0110
40:	•	_004 :NOP 0	1	1	2139095040	1 1111 0110
41:	•					

Рис. 4.2. Приклад роботи програми по першому каналу

Паралельно до основних підпрограм контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок окремою підпрограмою (з нижчим пріоритетом) реалізовано контроль параметрів мікроклімату виробничого середовища оператора котельної установки [47] та розроблено комплексну інформаційну безпеку об'єкта [48].

Алгоритм роботи засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок з компенсацією основних впливних факторів представлено на рис. 4.3.

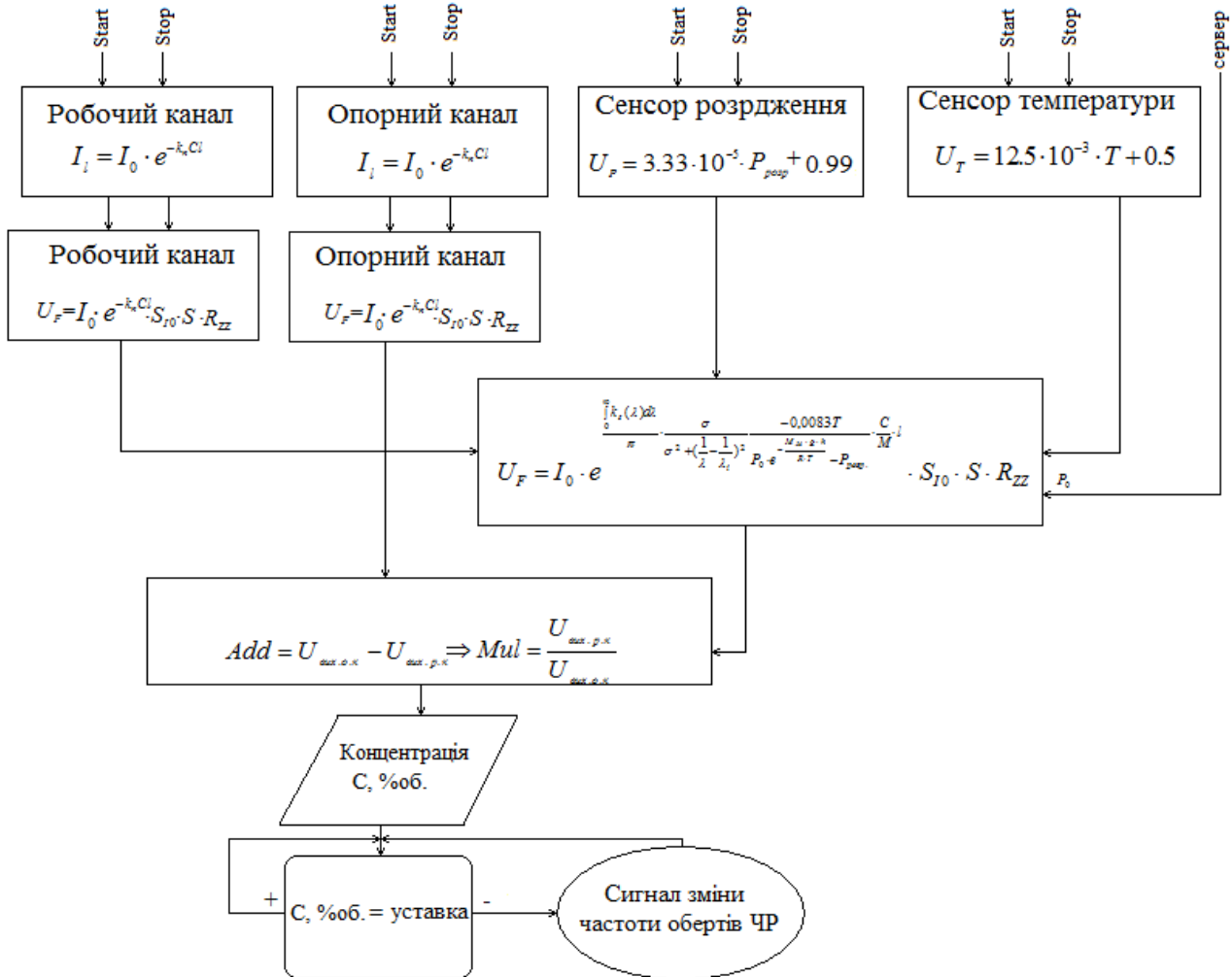


Рис. 4.3. Алгоритм роботи засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок

Також за рахунок введення додаткового каналу вимірювання густини димового газу удосконалено метод аварійного контролю згасання пальників котла, який на відміну від існуючих методів аналізує пробу не лише за концентрацією метану, а і за густиною димового газу, що дозволило підвищити вірогідність встановлення вірного діагнозу та зменшити хибні спрацювання при аварійному контролі. Експериментальні дослідження представлено у додатку А. Алгоритм аварійного контролю реалізовано програмно (додаток В).

Приклад роботи програми продемонстровано на прикладі роботи каналу вимірювання температури. Вимірювальний канал реалізовано у програмному

пакеті WINPLC7 [37] на мові програмування Ladder Diagram (LAD) [38]. У програмі функціональний блок FC 105 (Scaling analog value) приймає значення з ТРД у заданому діапазоні (0–9000 Ом) та відображає його як дійсне значення (змінна MD 4). При початку надходження сигналу з датчика запускається програмований таймер (T1). Змінна MD 4 на наступному етапі передається у математичний ланцюг, що описує функціональну залежність (2.24) і на виході ланцюга (змінна MD1) відображає значення температури газової суміші у °C. У робочому режимі сигналізатори Q0.0 та Q0.1 знаходяться у стані логічної одиниці. Приклад роботи програми [39] при значенні опору 1621.92 Ом знятого з ТРД і відповідно температури 116.82 °C на  $22 \cdot 10^3$  секунді після початку вимірювання зображено на рис. 4.4.

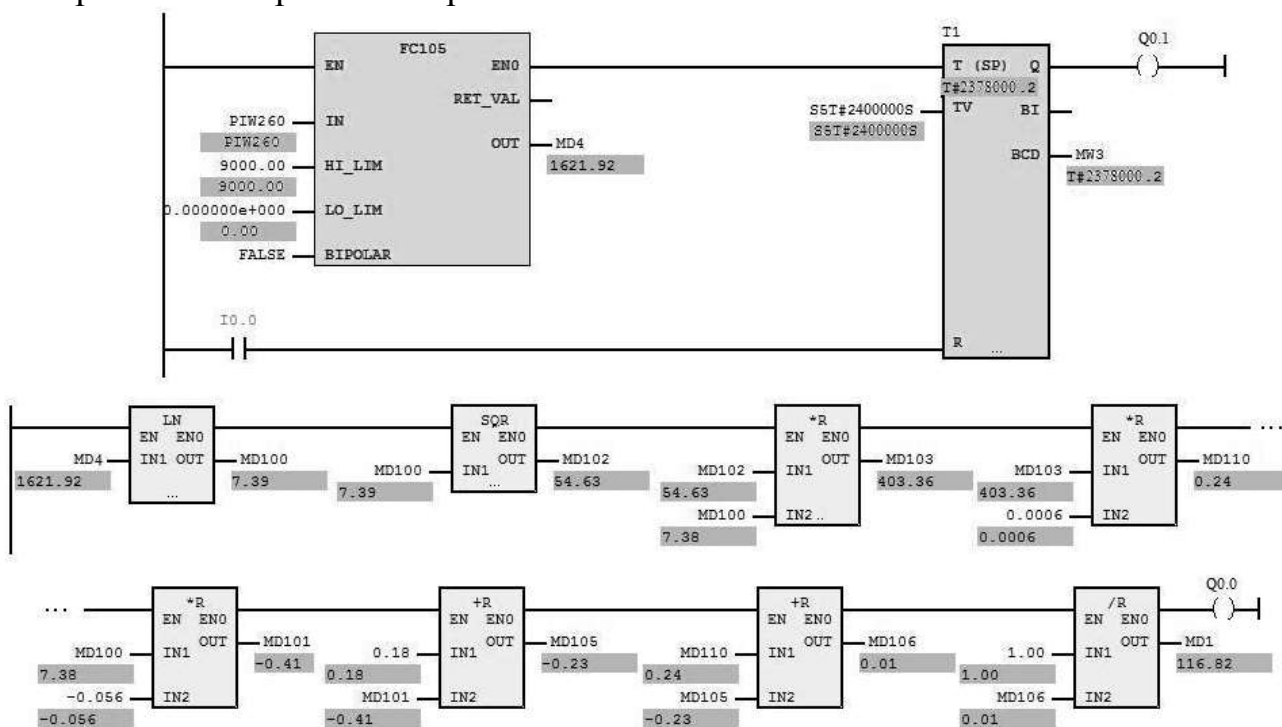


Рис. 4.4. Програмна реалізація вимірювального каналу температури

Розроблено експериментальний зразок засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок. Зовнішній вигляд представлено у додатку К.

## 4.2 Розробка лабораторного зразка та експериментальні дослідження

Схема для проведення лабораторного дослідження ЗВК представлена на рис. 4.5.

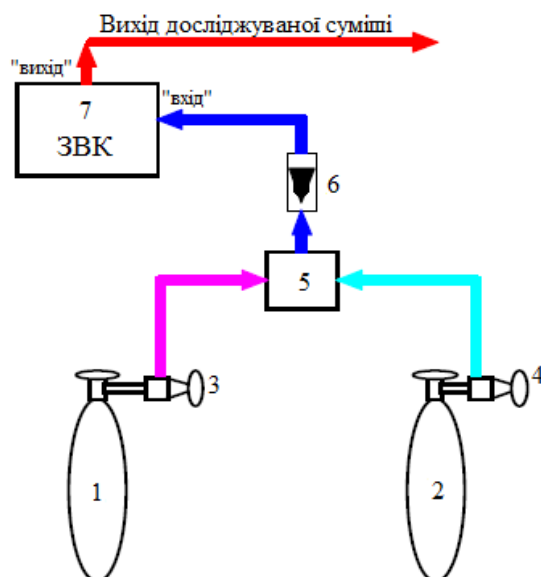


Рис. 4.5. Схема проведення лабораторного дослідження ЗВК:  
 1, 2 – балони з перевірювальною газовою сумішшю, 3,4 – крани, 5 – змішувач,  
 6 – ротометр, 7 – ЗВК

В якості додаткового газу використовується суміш азоту та двоокису сірки, яка знаходиться в балоні 1. Вимірювані газові суміші двоокису вуглецю знаходяться в балоні 2. Газова суміш по черзі з потрібного баллона подається через змішувач 5 на вхід ЗВК. Витрата газової суміші контролюється за допомогою ротаметра 6.

Перевірювальні газові суміші знаходяться під тиском 85 атм. і містять двоокис вуглецю і азот в балонах згідно табл. 4.1.

Таблица 4.1

Склад балонів з стандартизованою газовою сумішшю

Номери балонів	Об'ємна частка CO <sub>2</sub> , % об.	Об'ємна частка N <sub>2</sub> +SO <sub>2</sub> , % об.
№ 1	0	100
№ 2	10	90
№3	12	88
№ 4	14	86
№ 5	16	84

Для проведення експерименту було використано продукцію компанії ТОВ «Кріотехгаз КПК», а саме: двоокис вуглецю газоподібний, вищий сорт, ГОСТ 8050-85 (99,99 % об.); азот газоподібний, підвищеної чистоти, ГОСТ 9293-74 (99,9 % об.).

Порядок виконання експериментального дослідження: підключення шлангу від газової розв'язки та ротометра на штуцер "ВХІД" ЗВК"; підключення шлангу від штуцера "ВИХІД" на штуцер для виходу суміші що досліджується; відкриття крану 3 на балоні 1 та крану 4 на балоні 2; перевірка "нульових" показань ЗВК (згідно рис 4.2) у програмі SFG; закриття крану 3 на балоні з азотом, та крану 4 з двоокисом вуглецю; проведення вимірювання об'ємної частки  $CO_2$  в газовій суміші з балонів №2 та №1; процедуру вимірювання було проведено 10 раз; зняття показів та подальше опрацювання вимірювань (підрозділ 4.4 та 4.5).

Для реального теплопостачального підприємства, використовуючи кисневу формулу  $\alpha = \frac{21}{21 - O_2[\%]}$ , для оптимального значення КНП  $\alpha = 1,25, \pm 0,01$  (на прикладі котла ДЕ-25-14 ГМ), розрахуємо оптимальну концентрацію кисню у димових газах. Таким чином  $\mu(O_2)_{min} = 4,06\%$  і відповідно  $\mu(O_2)_{max} = 4,33\%$ .

На рисунках 4.7 та 4.8 представлено зміни концентрації кисню у димових газах котельних установок (рисунок 4.7 – без корегування вмісту кисню у відхідних газах, рисунок 4.8 – з корегуванням).

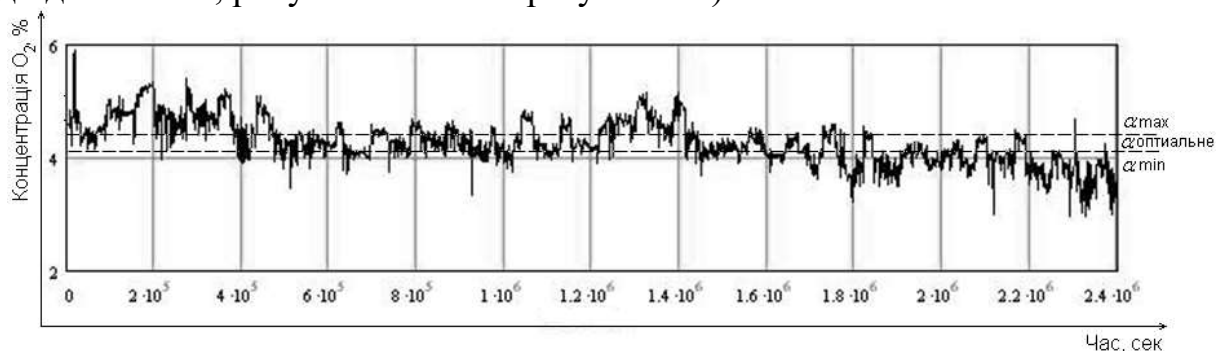


Рис. 4.7. Зміна концентрації кисню у димових газах без корегування

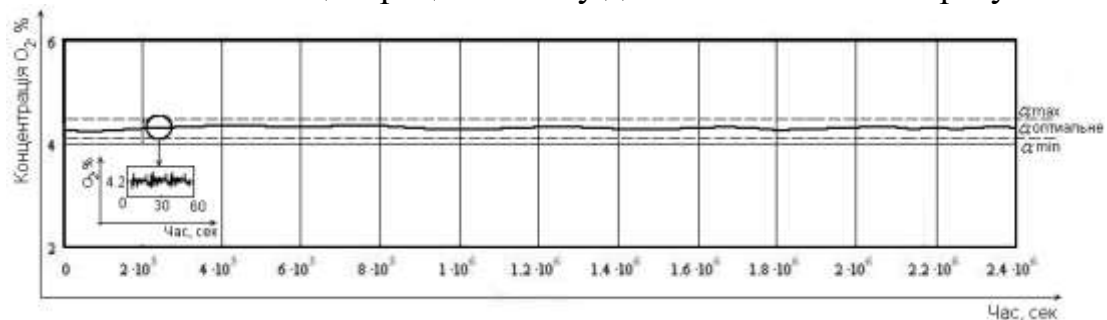


Рис. 4.8. Зміна концентрації кисню у димових газах з корегуванням

Отже, можна зробити висновок, що КУ, яка працює з контролем концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок має високу ресурсоенергоєфективність. Протягом всього періоду роботи концентрація кисню лежить в оптимальних межах (рисунок 4.8).

Для моделювання процесів у КУ використаємо пакет "SigmaFlame" [135], який призначений для розрахунку топкових процесів у котельній установці. Перевагами пакету є можливість аналізу теплової ефективності топки на основі характеру температур поверхонь нагріву та розрахунок ефективності

спалювання палива. Параметри які були внесені у програму відповідають експериментальним показникам на об'єкті вимірювання (котел ДЕ-25-14 ГМ) при об'ємі топки котла 1257,82 м<sup>3</sup>. Значення вхідних параметрів взято з [136].

На рис. 4.9 представлено концентрацію кисню (O<sub>2</sub>) у топці котла та за осями координат.

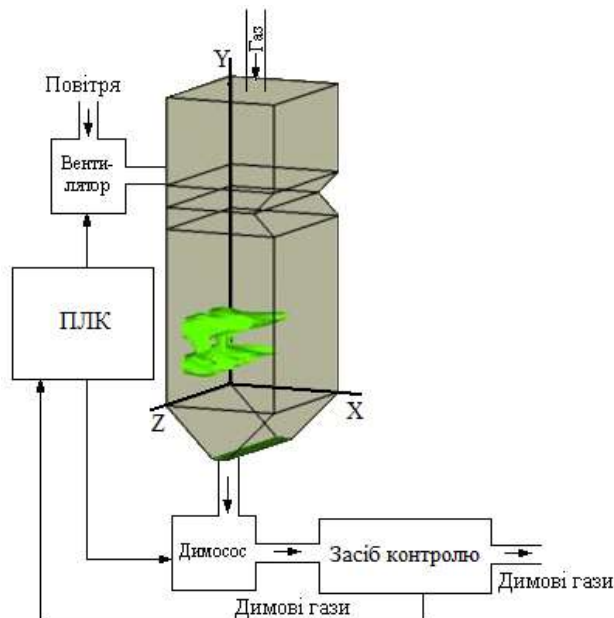


Рис. 4.9. Концентрація кисню (O<sub>2</sub>) у топці котла та за осями координат

З рис. 4.9 можна зробити висновок, що максимальна концентрація кисню (до 20%) знаходиться у зоні змішування газів, після чого кількість кисню різко зменшується у зоні горіння котла.

Враховуючи результати моделювання, можна зробити висновок що процес спалювання є оптимальним (рівномірне та повне згорання палива) за рахунок максимально ідеального співвідношення палива до повітря у топці котла. Дані результати вдалося досягти завдяки системі контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок (результатом контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок є висновок чи в оптимальних межах знаходяться концентрації заданих сумішей, якщо ні – змінюється кількість подачі повітря у топку котла до того часу поки концентрації не опиняться в оптимальних межах ).

### 4.3 Дослідження адекватності розробленої математичної моделі

Для перевірки математичної моделі розробленої у розділі 2, на макетній установці (додаток Ж) були проведені експериментальні дослідження по визначенню концентрації діоксиду вуглецю у димових газах із відомим вмістом CO<sub>2</sub> (10-12-14-16 %об.) на довжині хвилі 4,267 мкм. В якості джерела випромінювання застосовувався лазерний діод на основі InAsSbP потужністю 1,5 мВт, в якості приймача випромінювання – тонкоплівковий термоелектричний приймач (працює без охолодження). Результати вимірювань

інтенсивності випромінювання, яке пройшло через досліджуваний газ, а також впливних величин – тиску і температури – наведені на рис. 4.10–4.12 (на рис. 4.12. (1) – теоретичне значення напруги, (2) – виміряне). При цьому експериментальні вимірювання були поділені на 10 циклів (по 10 вимірювань в кожному циклі). Характеристики зовнішнього мікроклімату при дослідженні адекватності представлено у таблиці 4.2. Параметри зняти за допомогою комбінованого приладу testo 400.

Таблиця 4.2

Параметри мікроклімату при проведенні експерименту

Параметр \ № цикла вим.	Температура, °С	Вологість, %	Тиск мм. рт. ст..	Опади (дощ, сніг)
1	15.7	75	741	-
2	14.1	76	744	-
3	20.0	55	748	-
4	22.2	39	736	-
5	21.8	57	738	-
6	23.2	40	743	-
7	18.2	97	732	+
8	17.1	98	735	+
9	20.9	44	741	-
10	20.7	57	742	-

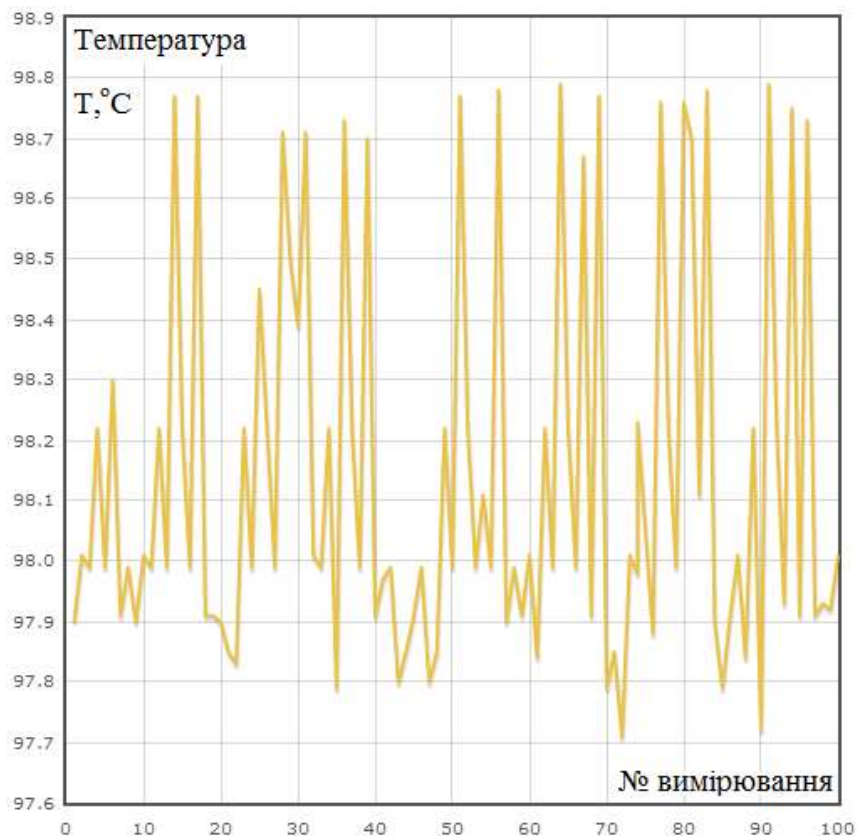


Рис. 4.10. Експериментальне вимірювання температури



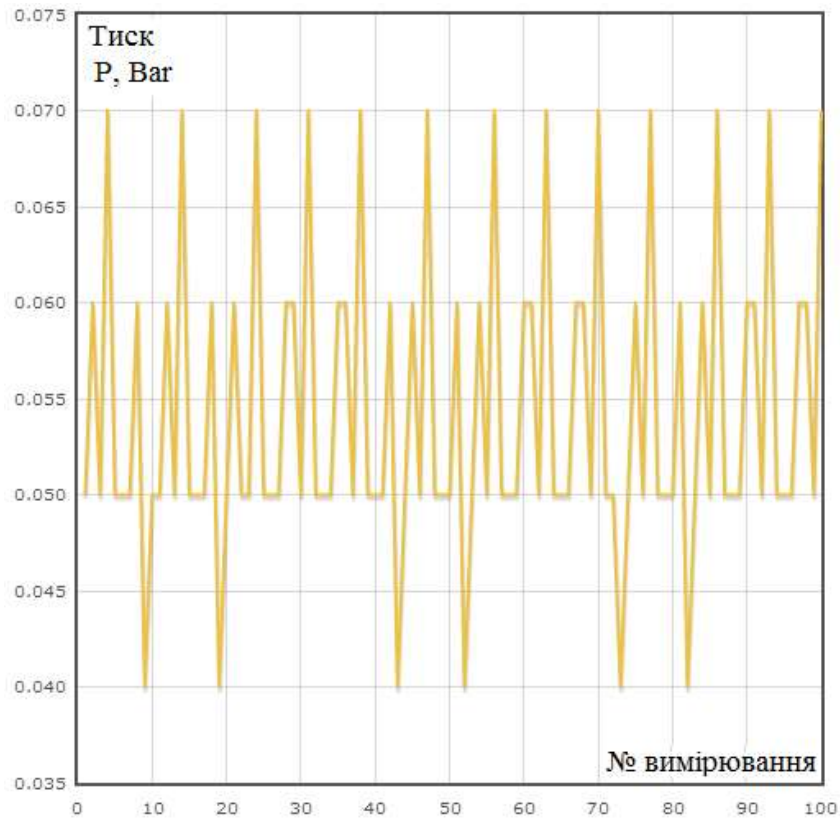


Рис. 4.11. Експериментальне вимірювання тиску

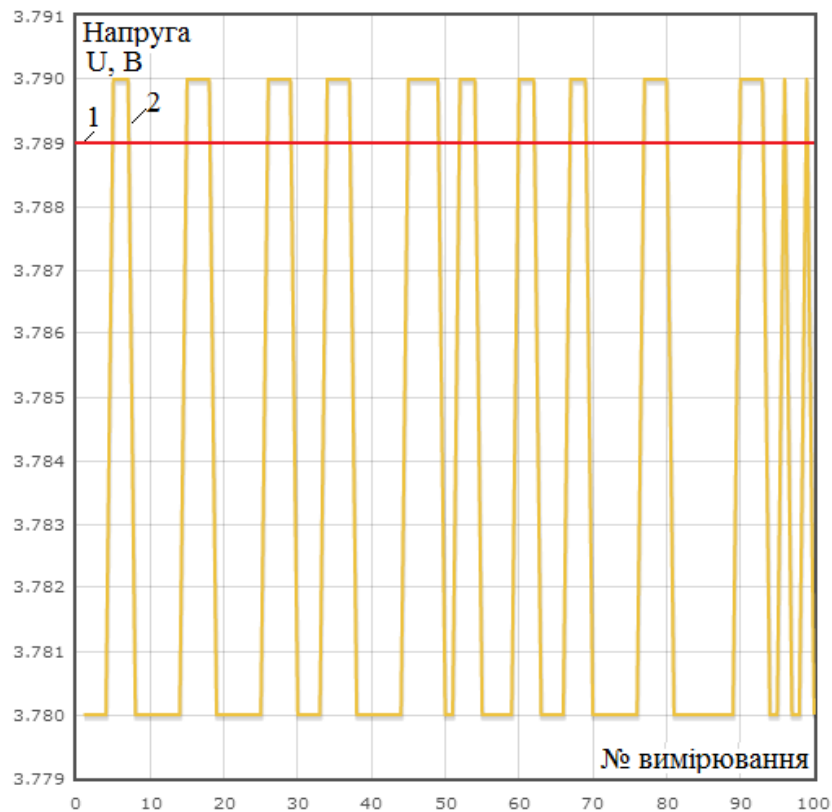


Рис. 4.12. Вимірювання напруги

Обчислимо концентрацію  $\text{CO}_2$  згідно математичної моделі, розробленої у розділі 2, що враховує вплив впливних факторів. В підсумку отримано ряд значень концентрації двоокису вуглецю (таб 4.3).

Таблиця 4.3

Концентрація CO<sub>2</sub> згідно з математичною моделлю 2.39

№ циклу вимір.\ дійсне значення	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.004	0.001	0.002	0.001	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002
10	10.035	10.035	10.044	10.092	10.092	10.092	10.092	10.092	10.035	10.035
12	12.017	12.018	12.007	12.034	12.055	12.043	12.023	12.011	12.015	12.017
14	14.029	14.027	14.021	14.022	14.029	14.021	14.023	14.028	14.021	14.022
16	16.017	16.019	16.007	16.009	16.003	16.011	16.015	16.016	16.017	16.015

Структуру моделі для оцінення похибок засобу контролю представлено на рис. 4.13.

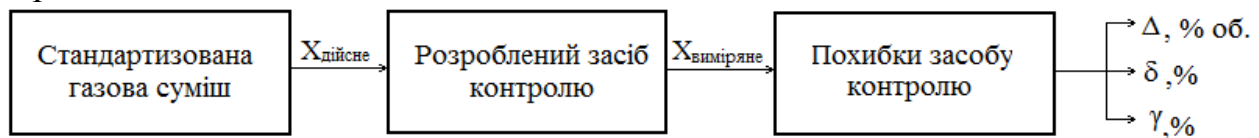


Рис. 4.13. Похибки засобу контролю

Як свідчать розрахунки, значенням, яке найбільше відрізняється від дійсного, є 10.092%. Отже, максимальна абсолютна, відносна та зведена похибка визначення концентрації за допомогою засобу контролю складає

$$\Delta = X_B - X_D = 0.092\% \text{ об.} \quad (4.1)$$

$$\delta = \frac{\Delta}{X_D} = \frac{10.092 - 10.000}{10.000} \cdot 100\% = 0.92\%. \quad (4.2)$$

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} \cdot 100\% = \frac{0.092}{20} \cdot 100\% = 0.46\%. \quad (4.3)$$

Тоді граничне значення зведеної похибки

$$-\gamma_{zp} < \gamma < +\gamma_{zp} \Rightarrow -0.1\% < \gamma < 0.1\% \quad (4.4)$$

Звідси можна визначити допустимі границі абсолютної та відносної похибок

$$\Delta_{zp} = \pm \frac{\gamma_{zp}}{100\%} \cdot X_N = \pm 0.1\% \text{ об.} \quad (4.5)$$

$$\delta_{zp} = \pm \gamma_{zp} \cdot \frac{X_N}{X_B} = \pm 0.99\% \quad (4.6)$$

Отже, граничне значення абсолютної похибки є сталим (не залежить від вимірюваної величини), а відносної – зростає зі зменшенням вимірюваної

величини, тобто точність засобу контролю зменшуватиметься, якщо покази приладу будуть значно меншими за границю вимірювання.

Провівши вимірювання за показом приладу  $X_{II}$ , отримуємо оцінку вимірюваної величини, істинне значення якої  $X$  лежить в межах

$$X_{II} - \Delta_{ep} < X < X_{II} + \Delta_{ep} \Rightarrow -9.9\% об. < X < 10.1\% об. \quad (4.7)$$

**Оцінення невизначеностей вимірювання.** Для оцінення невизначеності вимірювань скористаємось алгоритмом [93]. Проведена серія вимірювань інтенсивності випромінювання, яке пройшло через досліджуваний газ (повітря із вмістом  $CO_2$  10 % об. – 10000 рт, розрахунок в абсолютному відношенні представлений програмним розрахунком згідно з ГОСТ 2939-63 на рис. 4.14), а також впливних величин – температури і тиску.

Хімічна формула

Концентрація

ppm (млн<sup>-1</sup>)

мг/м<sup>3</sup>

Температура, °C

Результат розрахунку 10000 ppm (млн<sup>-1</sup>) CO2 = 14447.9071 мг/м<sup>3</sup>

Рис. 4.14. Вікно програми переведу ppm у мг/м<sup>3</sup>

Маючи набір статистичних даних по цим параметрам (А), розрахуємо для них стандартну невизначеність типу А:

$$u_A(\bar{U}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2}{n \cdot (n-1)}}, \quad (4.8)$$

$$u_A(\bar{T}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n \cdot (n-1)}}, \quad (4.9)$$

$$u_A(\bar{P}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n \cdot (n-1)}}, \quad (4.10)$$

де  $n$  – кількість вимірювань;  $\bar{U}$ ,  $\bar{T}$  і  $\bar{P}$  – середні арифметичні результатів вимірювань відповідно напруги, температури і тиску.

Розраховані значення дорівнюють  $\bar{U} = 3.783$  В,  $\bar{T} = 98.059$  °C,  $\bar{P} = 0.053$  Па.

Підставивши отримані значення у (4.29–4.31) отримаємо:

$$u_A(U_i) = 0,01 \text{ В}, u_A(T) = 0,2 \text{ °C}, u_A(P) = 0,01 \text{ Па}.$$

Тепер розрахуємо сумарну стандартну невизначеність типу А. Для цього визначимо, чи є корельованими між собою вищезгадані впливні величини. Обчислимо коефіцієнти кореляції для кожної з пар величин:

$$r(T, P) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T}) \cdot (P_i - \bar{P})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2 \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}}, \quad (4.11)$$

$$r(T, U_l) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T}) \cdot (U_{li} - \bar{U}_l)}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2 \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_{li} - \bar{U}_l)^2}}. \quad (4.12)$$

$$r(P, U_l) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}) \cdot (U_{li} - \bar{U}_l)}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_{li} - \bar{U}_l)^2}}. \quad (4.13)$$

Таким чином,  $r(T, P) = 0,602$ ,  $r(T, U_l) = 0,828$ ,  $r(P, U_l) = 0,709$ . Отже, кореляція між усіма впливними величинами наявна, тому для розрахунку сумарної стандартної невизначеності типу А використаємо формулу

$$\begin{aligned} u_{cA}^2 &= \left(\frac{\partial f}{\partial U_l}\right)^2 \cdot u_A^2(U_l) + \left(\frac{\partial f}{\partial T}\right)^2 \cdot u_A^2(T) + \left(\frac{\partial f}{\partial P}\right)^2 \cdot u_A^2(P) + \\ &+ 2r(T, U_l) \cdot \frac{\partial f}{\partial T} \cdot \frac{\partial f}{\partial U_l} \cdot u_A(T) \cdot u_A(U_l) + 2r(P, U_l) \cdot \frac{\partial f}{\partial P} \cdot \frac{\partial f}{\partial U_l} \cdot u_A(P) \cdot u_A(U_l) + \\ &+ 2r(T, P) \cdot \frac{\partial f}{\partial T} \cdot \frac{\partial f}{\partial P} \cdot u_A(T) \cdot u_A(P), \end{aligned} \quad (4.14)$$

де  $f$  – функція, яка пов’язує результат вимірювання і впливні величини, тобто функція (2.32).

Тобто задача зводиться до визначення коефіцієнтів чутливості  $\frac{\partial f}{\partial U_l}$ ,  $\frac{\partial f}{\partial T}$

та  $\frac{\partial f}{\partial P}$ . Частинні похідні знаходимо за допомогою математичного пакету

$$\text{Mathcad: } \frac{\partial f}{\partial U_l} = -904,00 \frac{\text{мг}}{\text{м}^3 \cdot \text{В}}, \quad \frac{\partial f}{\partial T} = -6,02 \frac{\text{мг}}{(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})}, \quad \frac{\partial f}{\partial P} = 0,001 \frac{\text{мг}}{(\text{м}^3 \cdot \text{Па})}.$$

А сумарна стандартна невизначеність типу А, що розрахована за рівнянням (4.14) складає  $u_{cA} = 7,91 \text{ мг/м}^3$ .

Для параметрів  $S_{IO}$ ,  $I_0$ ,  $R_{ZZ}$ ,  $S$ ,  $L$  відсутні статистичні дані вимірювань і не відомі закони розподілу. Тому згідно міжнародних рекомендацій визначаємо для них стандартну невизначеність типу В, припускаючи, що вони мають рівномірний закон розподілу:

$$u_B = \frac{\Delta}{\sqrt{12}}, \quad (4.15)$$

де  $\Delta$  – межі невилучених залишкових систематичних ефектів.

Користуючись довідниковими (використавши рекомендації роботи [164]) даними визначаємо відхилення для кожного із параметрів:  $S_{IO} = 5.062 \pm 0,03 \frac{A}{M^2}$ ;  $I_0 = 3 \cdot 10^{-3} \pm 0.03 \text{ Вм}$ ;  $R_{ZZ} = 9.88 \cdot 10^6 \pm 1,5 \text{ Ом}$ ;  $S = 2.6 \cdot 10^{-5} \pm 0.01 \text{ м}^2$ ;  $L = 0.1 \pm 0.001 \text{ м}$ .

Розраховані значення складають  $u_{B1} (S_{IO}) = 0,00144 \frac{A}{M^2}$ ;  $u_{B2} (I_0) = 0,407 \text{ Вм}$ ;  $u_{B3} (R_{ZZ}) = 0,00578 \text{ Ом}$ ;  $u_{B4} (S) = 2,89 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ ;  $u_{B5} (L) = 0,199 \text{ м}$ .

Сумарна стандартна невизначеність типу В дорівнює:

$$u_{cB}^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial S_{IO}}\right)^2 \cdot u_{B1}^2(S_{IO}) + \left(\frac{\partial f}{\partial I_0}\right)^2 \cdot u_{B2}^2(I_0) + \left(\frac{\partial f}{\partial R_{ZZ}}\right)^2 \cdot u_{B3}^2(R_{ZZ}) + \left(\frac{\partial f}{\partial S}\right)^2 \cdot u_{B4}^2(S) + \left(\frac{\partial f}{\partial L}\right)^2 \cdot u_{B5}^2(L). \quad (4.16)$$

Коефіцієнти чутливості складають:  $\frac{df}{dS_{IO}} = -11800,4 \text{ мг}/(\text{м}^3 \frac{A}{\text{м}^2})$ ;  $\frac{df}{dI_0} = 9,01$

$\text{мг}/(\text{м}^3 \cdot \text{Вм})$ ;  $\frac{df}{dR_{ZZ}} = -15,08 \text{ мг}/(\text{м}^3 \cdot \text{Ом})$ ;  $\frac{\partial f}{\partial S} = 917118 \text{ мг}/(\text{м}^3 \cdot \text{м}^2)$ ;

$$\frac{\partial f}{\partial L} = 354,78 \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{м}^3).$$

Таким чином,  $u_{cB} = 119,1 \text{ мг}/\text{м}^3$ .

Решта параметрів у моделі є константами, тому невизначеність для них не оцінюється.

Сумарна стандартна невизначеність:

$$u_c = \sqrt{u_{cA}^2 + u_{cB}^2} = 121,01 \text{ мг} / \text{м}^3 \quad (4.17)$$

Далі розрахуємо розширену невизначеність результату вимірювання. Для цього спочатку отримаємо значення коефіцієнту охоплення, що створює інтервал, який відповідає рівню довіри  $p = 0,95$ . Коефіцієнт охоплення  $k$  в загальному випадку визначається:

$$k = t_p(b_{eff}), \quad (4.18)$$

де  $t_p(b_{eff})$  – коефіцієнт із розподілу Стьюдента для ймовірності охоплення  $p$  з ефективним числом степенів вільності  $b_{eff}$ .  $t_p(b_{eff})$  вибирається із таблиці за розрахованим значенням  $b_{eff}$ .

$$b_{eff} = \frac{u_c^4}{\frac{u_A^4(\overline{U_l})}{b} \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial U_l}\right)^4 + \frac{u_A^4(\overline{T})}{b} \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial T}\right)^4 + \frac{u_A^4(\overline{P})}{b} \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial P}\right)^4}, \quad (4.19)$$

де  $b$  – число степенів вільності. (для невизначеностей вхідних величин, які визначались за типом А,  $b = n-1$ . Для невизначеностей, отриманих за типом В число степенів вільності приймається рівним нескінченності. Тому доданки, які містять невизначеності, отримані за типом В, будуть рівними нулю і у формулі (4.40) не вказані).

Підставивши отримані раніше значення, отримуємо  $b_{eff} = 2 \cdot 10^6$ . Зважаючи на велике значення  $b_{eff}$ , із таблиці коефіцієнтів Стюдента для довірчої ймовірності 0,95, приймаючи  $b_{eff} = \infty$ , вибираємо  $k = 1,96$ .

Отже, розширена невизначеність результату вимірювання при рівні довіри 0,97:

$$U = k \cdot u_c = 237.18 [\text{мг} / \text{м}^3] \quad (4.20)$$

#### 4.4 Оцінювання вірогідності контролю та точності вимірювань концентрацій димових газів котельних установок.

Відомо, що вірогідність контролю відображає ступінь об'єктивності отриманих результатів у порівнянні з нормованим значенням вимірюваної величини. Вірогідність контролю складається із інструментальної та методичної вірогідностей.

Розглянемо спочатку інструментальну вірогідність контролю. Вона визначається таким чином

$$D_i = 1 - \alpha - \beta, \quad (4.21)$$

де  $\alpha$  – помилка першого роду (ризик виробника);  $\beta$  – помилка другого роду (ризик замовника).

Контрольованим параметром у даній роботі є концентрація газу  $C$  (4). Її визначення проводяться із певною похибкою  $\Delta$ . Відповідно, помилки 1-го та 2-го роду описуються рівняннями [115]:

$$\alpha = \int_{C_A}^{C_B} f(C) \left[ \int_{C_{A-\Delta}}^{C_A} \varphi(\Delta) d\Delta + \int_{C_B}^{C_{B+\Delta}} \varphi(\Delta) d\Delta \right] dC, \quad (4.22)$$

$$\beta = \int_{C_B}^{C_{B+\Delta}} f(C) \left[ \int_{C_{B-\Delta}}^{C_B} \varphi(\Delta) d\Delta \right] dC + \int_{C_{A-\Delta}}^{C_A} f(C) \left[ \int_{C_A}^{C_{A+\Delta}} \varphi(\Delta) d\Delta \right] dC, \quad (4.23)$$

де  $f(C)$  – щільність розподілу ймовірностей концентрації газу;  $\varphi(\Delta)$  – щільність розподілу ймовірностей похибок вимірювання концентрації газу;  $C_A, C_B$  – границі допуску концентрації газу.

Графічне представлення похибки вимірювань  $\Delta$  зображене на рис. 4.15.

Значення концентрації газу та значення похибок вимірювання розподілені за нормальним законом (рис. 4.16) і описуються рівняннями (4.24-4.25).

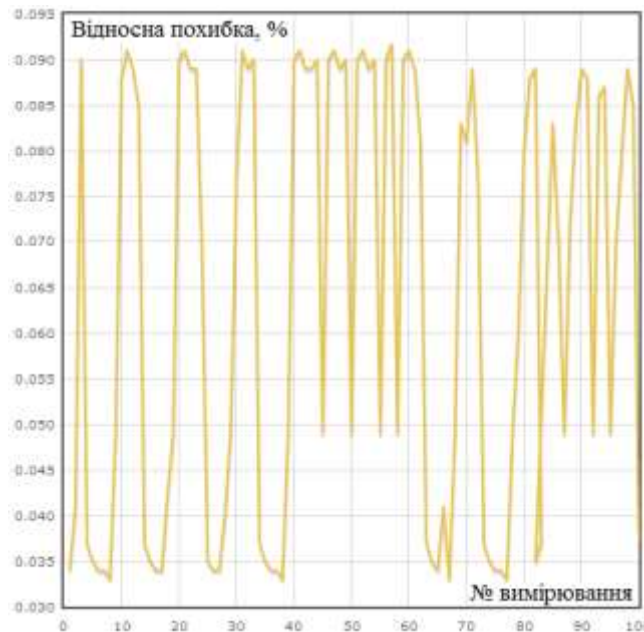


Рис. 4.15. Графічне представлення похибки вимірювань  $\Delta$

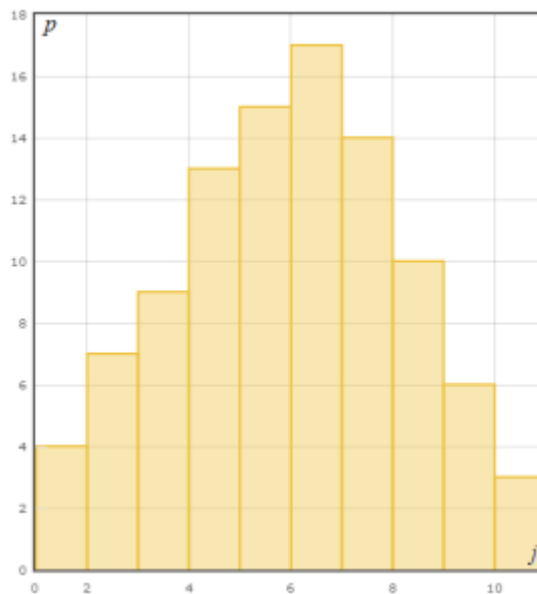


Рис. 4.16. Гістограма розподілу частот ймовірностей значень концентрації досліджуваного газу і ймовірностей значень похибок вимірювання:  
 $j$  – номер інтервалу, на які розбиті діапазони значень концентрації газу і похибок вимірювання;  $p$  – кількість значень концентрації газу і похибок вимірювання, які потрапляють в заданий інтервал

$$f(C) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\frac{(C-\bar{C})^2}{2\sigma^2}}; \quad (4.24)$$

$$\varphi(\Delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\frac{(\Delta-\bar{\Delta})^2}{2\sigma^2}}, \quad (4.25)$$

де  $\sigma$  – середнє квадратичне відхилення.

Графічне представлення функцій  $f(C)$  і  $\varphi(\Delta)$  зображене на рис. 4.17–4.18.

Перевірка того, що і значення концентрації газу, і значення похибки вимірювання дійсно розподілені за нормальним законом, було здійснено за допомогою критерію  $\chi^2$ -Пірсона.

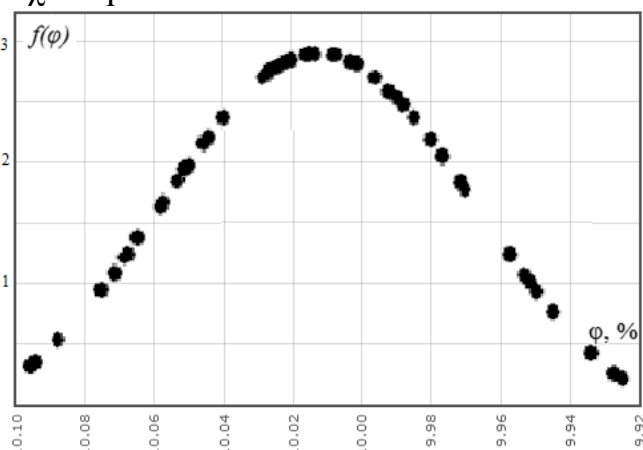


Рис. 4.17. Функція щільності розподілу ймовірностей концентрації газу

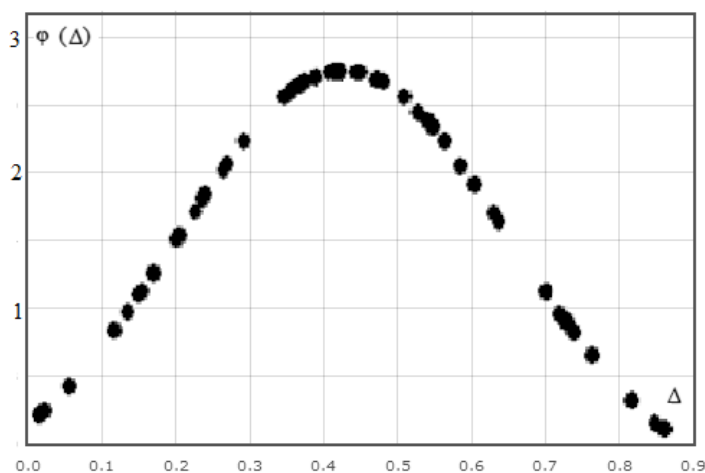


Рис. 4.18. Функція щільності розподілу ймовірностей похибки вимірювання концентрації газу

Границі допуску задамо в межах 3% відхилення від дійсного значення концентрації газу (10 %об. або 14448 мг/м<sup>3</sup>):  $C_A = 9,7$  %об.,  $C_B = 10,3$  %об. або  $C_A = 14015$  мг/м<sup>3</sup>,  $C_B = 14881$  мг/м<sup>3</sup>.

Підставляючи задані та експериментальні значення у формули (4.22-4.23), отримуємо значення  $\alpha = 0,0312$ ,  $\beta = 0,0010$ . Із (4.21) інструментальна вірогідність контролю  $D_i = 0,968$ , вона є вищою у порівнянні із вірогідністю контролю відомих приладів газового аналізу (0,8–0,94), які були представлені у табл. 1.3. Отже, враховуючи цей результат, можна вважати мету роботи досягнуто (достовірність контролю підвищено на 0,028).

Методична вірогідність контролю концентрації газу із використанням розробленого засобу підвищується у порівнянні із існуючими засобами контролю за рахунок врахування більшої кількості впливних параметрів (температури, тиску, розширення спектральних ліній досліджуваного газу).

Точність вимірювань є оберненою величиною до відносної похибки, вираженої у відносних одиницях. Враховуючи, що за результатами



експериментальних досліджень для зразкової концентрації  $\text{CO}_2$   $14448 \text{ мг/м}^3$  (10% об. у відносному відношенні) отримано значення сумарної стандартної невизначеності  $121 \text{ мг/м}^3$ , то відносна похибка вимірювань складає 0,92 %. Таким чином, отримаємо точність  $T = 108$ . Порівнюючи це значення із значеннями точності приладів, наведених у розділі 1, можна зробити висновок, що точність вимірювань за допомогою розробленого засобу підвищено у порівнянні із існуючими приладами.

#### **4.5 Висновки до розділу 4**

В четвертому розділі монографії було обгрунтовано вибір апаратного та програмного забезпечення для реалізації засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок. Розроблено програму контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок. Програму написано у програмному пакеті WinPLC7 на мові програмування STL.

Перевірено працездатність засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок при роботі котла ДЕ-25-14 ГМ. Результат – забезпечення максимальної енергоефективності КУ.

Оцінена адекватність розробленої математичної моделі та визначено вірогідність контролю та точність вимірювань концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок. Було проведено оцінку невизначеностей вимірювання. Результатом оцінок було підтвердження адекватності розробленої моделі.

Результати досліджень, що приведені в даному розділі, опубліковані в таких роботах автора [13, 14, 15, 52, 36, 39, 103, 104, 105, 107, 113].

## ВИСНОВКИ

У монографії розроблено засіб контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок на основі оптико-абсорбційного методу з покращеними метрологічними характеристиками.

Дослідження, проведені роботі, дозволили отримати нові, науково-обґрунтовані теоретичні та практичні результати, які є істотними для підвищення точності при необхідній швидкодії процесу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок на основі оптико-абсорбційного методу з компенсацією впливних факторів оптичного перетворювача.

Основні наукові висновки та результати роботи полягають в такому:

1. Проведено аналіз існуючих систем та методів контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок. На основі аналізу відомих методів та засобів контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок встановлені їх основні недоліки та вибрано напрямок досліджень.

2. Вдосконалена математична модель перенесення випромінювання в середовище димового газу котельних установок, яка, на відміну від існуючих враховує особливості об'єкта контролю, а саме значення тиску в загальному випадку представляється як атмосферний тиск та розрідження, причому у атмосферному тиску враховується висота засобу контролю над рівнем моря, що дозволило підвищити достовірність контролю.

3. Одержав подальший розвиток метод вимірювального контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок в основній інфрачервоній області та розроблено структурну схему з відкритими вимірювальним та компенсаційним каналами для його здійснення, що дало змогу зменшити кількість контрольованих параметрів (вологість, запиленість), який, на відміну від відомих, відрізняється тим, що значення концентрації двоокису вуглецю отримують на основі співвідношення показників інтенсивностей світлових потоків, які пройшли через відкриті вимірювальний та компенсаційний канали, причому співвідношення показників інтенсивностей світлових потоків враховує як адитивні, так і мультиплікативні коефіцієнти поправок залежно від діапазону вимірювання.

4. Вдосконалено математичну модель фотоелектричного вимірювального перетворювача інтенсивності світлового потоку, яка враховує паразитні параметри складових елементів фотоприймача, отримано рівняння перетворення, що однозначно пов'язує вихідну величину – значення вихідної напруги фотоприймача та вхідну – значення інтенсивності світлового потоку, що дозволило підвищити достовірність контролю.

5. Проведено аналіз коефіцієнту передачі оптичного вимірювального перетворювача, коефіцієнт поглинання  $\text{CO}_2$  у димових газах котельних установок та досліджено вплив ширини спектру приймача ІЧ випромінювання на чутливість оптичного каналу газового сенсора.

6. Технічно обґрунтовано реалізацію засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок. Розраховано статичні та динамічні характеристики засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок на основі оптико-абсорбційного методу.

7. Розроблено структурну та функціональну схеми засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок та представлено рівняння перетворення вимірювального каналу.

8. Розроблені методи компенсації впливу впливних факторів на результат вимірювання концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок. Експериментально досліджено залежність вихідних характеристик оптичного перетворювача від температури без термокомпенсації та з термокомпенсацією. Наведена методика термокомпенсації вихідних характеристик оптичного перетворювача. Оцінено вплив тиску, вологості та запиленості проби димового газу на результат вимірювання концентрації компонентів.

9. Розроблений програмний засіб та промисловий зразок для автоматичного контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок. Обґрунтовано вибір апаратного забезпечення – це потужний контролер VIPA 200V, та програмне забезпечення для реалізації засобу. Програму контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок написано у програмному пакеті WinPLC7 на мові програмування STL.

10. Розроблено алгоритм контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок, який дозволив підтримувати оптимальне співвідношення паливо-повітря у топці котла протягом всього періоду роботи КУ.

11. Розроблено алгоритмічну організацію адаптації засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок до реальних умов експлуатації, яка враховує не лише зовнішні збудження а і тип котлоагрегата.

12. Проведені експериментальні дослідження з метою перевірки адекватності розробленої математичної моделі. Результати експерименту показали повну відповідність теоретичних та практичних (експериментальних) результатів. Розроблений засіб контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок має швидкодію на рівні 0,44 с при максимальній відносній похибці 0,92%.

13. Оцінена адекватність розробленої математичної моделі та визначено вірогідність контролю та точність вимірювань концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок. Було проведено оцінку невизначеностей вимірювання. Результатом оцінок було підтвердження адекватності розробленої моделі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Франко Р.Т. Газоаналитические приборы и системы / Р.Т. Франко, Б.Г. Кадук, А.А. Кравченко. – М.:Машиностроение, 1983. – 358с.
2. Соколов В.А. Методы анализа газов / В.А. Соколов – М.: Гостоптехиздат, 1958. – 340с.
3. Кустикова М.А. Методические указания к лабораторным работам по разделу “Опτικο-электронные газоанализаторы” курса “Экологический мониторинг” / Кустикова М.А., Мешалкина М.Н., Мусяков В.Л., Тимофеев А.Н.. – С-Пб: 2003. – С. 73-89.
4. Теплюх З.М. Синтезатор перевірювальних сумішей для хроматографів складу димових газів / З.М. Теплюх // Энергетика и Электрификация. - 2004. – №3. – С. 10-18.
5. Антропов Д.Н. Энергосберегающие режимы работы теплоэнергетических установок с применением микропроцессорных комплексов: дис. канд. техн. наук / Антропов Д.Н. – Казань, 2007. – 143 с.
6. Кучерук В.Ю. Використання ресурсозбережних технологій на теплопостачальних підприємствах / В.Ю. Кучерук, І.А. Дудатьєв // Збірник наукових статей II-го всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю. – Вінниця, 2009. – С.283-287.
7. Кучерук В.Ю. Система контролю складу димових газів / В.Ю. Кучерук, І.А. Дудатьєв // Збірник наукових статей III-го всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю. – Вінниця 2011. – Т 2. – С. 345 – 347.
8. Парахин Н.Ф. Оптимизация теплового режима котла ДЕ-25-14 ГМ при отоплении коксовым газом / Н.Ф. Парахин, А.К. Алексеева // Энергосбережение.– 2007. – №16. – С. 26-28.
9. Дудатьєв І.А. Енергозберігаюча електромеханічна система автоматичного керування котельною установкою з контролем складу димових газів. / І.А. Дудатьєв // Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт галузі “Електротехніка та електромеханіка”. – Дніпродзержинськ, 2010. – С. 27.
10. Кучерук В.Ю. Система контролю складу димових газів котельних установок / В.Ю. Кучерук, І.А. Дудатьєв // Науково-практична конференція професорсько-викладацького складу та студентів ВНТУ. –Вінниця, 2010. – Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2010/inaeksu/txt/Dudatiev.pdf>.
11. Кучерук В.Ю. Оптико-абсорбційний інфрачервоний метод контролю складу димових газів котельних установок // В.Ю. Кучерук, І.А. Дудатьєв / V International conference on optoelectronic information technologies “Photonics-ODS 2010”. – Vinnytsia, 2010. – P. 189.
12. Козубовський В.Р. Оптичні прилади газового аналізу для контролю забруднення атмосферного повітря / В.Р. Козубовський // Метрологія та прилади. – 2010. – №2. – С. 62-70.
13. Кучерук В.Ю. Система автоматичного керування котельною установкою / В.Ю. Кучерук, І.А. Дудатьєв // Тези доповідей десятої

міжнародної науково-практичної конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2010)». – Вінниця, 2010. – С. 265.

14. Кучерук В.Ю. Ресурсоенергозбережна система автоматичного керування котельною установкою з контролем складу димових газів / В.Ю. Кучерук, І.А. Дудатьєв // Вісник інженерної академії України. – Київ, 2010. – №3-4. – С. 98-103.

15. Кучерук В.Ю. Комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система контролю складу димових газів котельних установок / В.Ю. Кучерук, І.А. Дудатьєв // Матеріали I Міжнародної конференції студентів і молодих науковців “Сучасні інформаційні технології 2011”. – Одеса, 2011. – С. 55-56.

16. Кучерук В.Ю. Метод вимірювання параметрів на основі генератора хаотичних коливань / В.Ю. Кучерук, В.С. Маньковська, І.А. Дудатьєв // Міжнародний науково-технічний журнал “Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія”. – Вінниця, 2010. – С. 99-103.

17. Кучерук В.Ю. Визначення параметрів роторного кола асинхронних машин з використанням функцій чутливості / В.Ю. Кучерук, П.І. Кулаков, І.О. Денищук, І.А. Дудатьєв // Вісник інженерної академії України.– Київ, 2010. – Бюл. № 1. – С. 205-209.

18. Кучерук В.Ю. Діагностування електромоторів в реальному часі / В.Ю. Кучерук, О.П. Войтович, І.А. Дудатьєв // Радіоелектронні комп'ютерні системи. – Харків, 2008. – С. 20 – 24.

19. Вронский В. А. Прикладная экология / Вронский В. А. – Ростов-на-Дону: Феникс. - 1996. - 512с.

20. Бродский А.К. Краткий курс общей экологии / Бродский А.К. – С-Пб. – 1992. –152с.

21. А.Ю. Ретюма. Вторжение в природную среду. Оценки воздействия /А.Ю. Ретюма. - М.: Прогресс. – 1983. - 192 с .

22. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами:энергетические системы / А.А. Колесников. – М.: Едиториал УРСС, 2005. – 457 с.

23. Кучерук В.Ю. Синергетичні методи керування теплоенергетичними об'єктами / В.Ю. Кучерук, І.А. Дудатьєв // Міжнародна науково-практична конференція “Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія”. – Вінниця, 2010. – С. 47.

24. Фокин В.М. Теплогенерирующие установки систем теплоснабжения / В.М. Фокин. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 352с.

25. Садыков Р.А.Компьютерная симуляция теплогенерирующих установок/ Р.А. Садыков, Д.Н. Андропов, Д.В. Крайнов // Известия КазГАСУ. - 2009. – №1 (11). - С196-200.

26. Кнорринг В.Г. Автоматизирования системы контроля и управление процессом горения в топливосжигающем оборудовании / В.Г. Кнорринг, О.Н. Новиков, А.Н. Окатьев // Межвуз. сб. науч. тр.. Пенз. гос. ун-т. - 2000. – №25. – С.112-117.

27. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами / В.Я. Ротач. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 150 с.
28. Тюрин М.П. Повышение экономичности работы промышленных котлоагрегатов / М.П. Тюрин, Л.М. Кочетов, Е.В. Харами. – М.: РХТУ, 1999. – 290 с.
29. Дудатьєв І.А. Математичне моделювання процесів горіння в котельних установках / В.Ю. Кучерук, І.А. Дудатьєв // Науково-практична конференція професорсько-викладацького складу та студентів ВНТУ. – Вінниця, 2011. – Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2011/inaeksu/txt/dudatev.pdf>.
30. Офіційний сайт корпорації SE [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www.VIPA.de](http://www.VIPA.de).
31. Володарський Є.Т. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю: навч. пос. / Є.Т. Володарський, В.В. Кухарчук, В.О. Поджаренко, Г.Б. Сердюк. – Вінниця ВДТУ, 2001. – 257 с.
32. Кухарчук В.В. Метрологія та вимірювальна техніка: навч. пос. / В.В. Кухарчук, В.Ю. Кучерук, В.П. Долгополов, Л.В. Грумінська. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 220 с.
33. Пасынков В.В. Полупроводниковые приборы / В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин, А.Д. Шинков. – М.: Высшая шк., 1973. – 398 с.
34. Денисенко В.В. Термометры сопротивления, термисторы и термопары / В.В. Денисенко, А.Н. Халявко // ПиКАД. - 2005. – №1. – С. 50-54
35. Викулин И.М. Физика полупроводниковых приборов / И.М. Викулин, В.И. Стафеев. – М.: Радио и связь, 1990. – 264 с.
36. Кучерук В.Ю. Лабораторний стенд для вивчення принципу дії терморегулятора / В.Ю. Кучерук, В.М. Севастьянов, І.А. Дудатьєв // Вісник інженерної академії України. – Київ, 2009. – Бюл. № 3-4. – С.174-176.
37. Інструкції до програмного забезпечення SE [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www.WinPLC7.de](http://www.WinPLC7.de).
38. Кучерук В.Ю. Програмування логічних контролерів SCHNEIDER ELECTRIC / В.Ю. Кучерук, В.О. Поджаренко, П.І. Кулаков. – Вінниця: ВДТУ, 2002. – 132 с.
39. Кучерук В.Ю. Система вимірювання температури димових газів котельних установок / В.Ю. Кучерук, І.А. Дудатьєв // Вісник ЧДТУ. - 2011. – №1. – С.123-128.
40. Бугайов Ю.В. Використання мікропроцесорних систем для компенсації температурної похибки оптичних перетворювачів / Ю.В. Бугайов, Ю.В. Шабатура // Вісник Технологічного університету Поділля. - 2003. – №3/Т.2. – С. 152-154.
41. Фединець В.О. Дослідження динамічних характеристик термоперетворювачів для вимірювання температури газових середовищ / В.О. Фединець // Вимірювальна техніка та метрологія. - 2003. – № 63. – С. 60-62.

42. Фединець В.О. Вимірювання швидкозмінних температур газових потоків шляхом введення поправки у покази приймачів температури / В.О. Фединець // Національний лісотехнічний університет України. - 2007. –№ 17.5. – С. 217 - 220.
43. Дудатьєв І.А. До питання оптимального вимірювального перетворення інформації у газоаналітичних системах / В.Ю. Кучерук, І.А. Дудатьєв // Тези доповідей третьої міжнародної науково-практичної конференції «Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації». – Вінниця, 2011. – С. 216-217.
44. Білинський Й.Й. Математична модель аналізатора вологості газу / Й.Й. Білинський, В.В. Онушко // Наукові праці ВНТУ. - 2010. – № 4. – 124 с.
45. Патент на корисну модель 57897, Україна, G01N27/22. Резонансний вологомір / Васюра А.С., Кучерук В.Ю., Дудатьєв І.А.; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет; заявл. 30.11.2010; опубл. , Бюл. № . – 3 стор.
46. Поджаренко В.О. Основи мікропроцесорної техніки: навчальний посібник / В.О. Поджаренко, В.Ю. Кучерук, В.М. Севастьянов. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 206 с.
47. Кучерук В.Ю. Система контролю параметрів мікроклімату виробничого середовища оператора котельної установки / В.Ю. Кучерук, І.А. Дудатьєв, Н.А. Дудатьєва // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - 2010. – № 1. – С. 232-235.
48. Дудатьєв А.В. Аналіз забезпечення комплексної інформаційної безпеки в умовах конфліктів / А.В. Дудатьєв, О.П. Войтович, І.А. Дудатьєв // Вісник інженерної академії України. - 2010. – №2. – С.83-88.
49. Бужинський В.В. Автоматизація теплоенергетичних та теплотехнологічних процесів і установок / В.В. Бужинський, М.М. Чепурний. – Вінниця: ВНТУ, 2005. – 48 с.
50. Патент на корисну модель 5163, Україна, G01 N27/72. Високоточний термомагнітний газоаналізатор / Целіщев О.Б., Стенцель Й.І., Стенцель В.В.; заявники та патентовласники Целіщев О.Б., Стенцель Й.І., Стенцель В.В. №20040705790; заявлено 14.07.2004; опубл. 15.02.2005, Бюл. № 2. – 2005.- 4 с.
51. Кучерук В. Ю. Система для контролю складу димових газів котельних установок з підтримкою оптимального коефіцієнту надлишку повітря у топці котлоагрегата / В.Ю. Кучерук, І.А. Дудатьєв // Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування”. – Вінниця, 2011. – С. 125-126.
52. Кучерук В.Ю. Мікропроцесорна інформаційно-вимірювальна система контролю складу димових газів котельних установок / В.Ю. Кучерук, І.А. Дудатьєв // I International Scientific Conference in memory of Professor Vladimir Podzharenko Measurement, control and diagnosis in technical systems (MCDTS -2011). – Vinnitsya, 2011. – P. 167.

53. Дудатьєв І.А. Система газового аналізу для контролю забруднення атмосферного повітря / І.А. Дудатьєв // Науково-практична конференція професорсько-викладацького складу та студентів ВНТУ. – Вінниця, 2011. – Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2011/inmt/txt/dudatiev.pdf>.
54. Поліщук Є.С. Метрологія та вимірювальна техніка / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук, В.М. Ванько, Т.Г. Бойко. – Львів: Видавництво “Бескид Біт”, 2003. – 311 с.
55. Метрологія. Терміни та визначення: ДСТУ 2681-94.- [Чинний від 1994–04–01]. – Київ : Держспоживстандарт України, 1994. – 12 с. – (Національні стандарти України).
56. Франко Р.Т. Газоаналитические приборы и системы / Франко Р.Т., Кадук Б.Г., Кравченко А.А. - М.: Машиностроение. – 1983. - 128 с.
57. Горелик Д.О. Мониторинг загрязнения атмосферы и источников выбросов / Горелик Д.О., Конопелько Л.А. - М.:из-во Стандартов. – 1992. – 432 с.
58. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия / Ельяшевич М.А. - М.:из-во Стандартов. – 1962. – 452 с.
59. Смирнов Н.И. Оптимизация настроечных параметров регулирующих устройств в АСУ // Теория и практика построения и функционирования АСУ ТП: труды Международ. науч. конф. - М.: Издательство МЭИ. - 2003. - С.52-57.
60. Левин А.С. Введение в общую экологию:курс лекций / Левин А.С. – Таллин: LEX. - 1996. -174 с.
61. On-line расчеты в Интернет на Mathcad Application Server (MAS). – Режим доступа:<http://www.vpu.ru/mas>.
62. Горелик Д.О. Экологический мониторинг. Оптико-электронные приборы и системы/ Горелик Д.О. - Том 2. – СПб.: Крисмас+, 1998. -592 с.
63. Горелик Д.О. Мониторинг загрязнения атмосферы и источников выбросов / Д.О. Горелик, Л.А. Конопелько. – М.: из-во Стандартов, 1992. – 432 с.
64. Л.Н. Панченко. Проверенное решение автоматизации тепловых котельных на базе контроллеров МФК» / Л.Н. Панченко, И.В. Карандасов, В.И. Самыкин, А.В. Селезнев // Промышленные АСУ и контроллеры. - 2003. – № 4. – С.19-23.
65. Ресурсоэнергосбережение и альтернативное топливо / Под ред. Пермякова Б.А. - М.: НПП Экология-энергетика, МГСУ. - 2001. – 80 с.
66. Горелик Д.О. Экологический мониторинг. Оптико-электронные приборы и системы. Том 1/ Горелик Д.О., Конопелько Л.А., Панков Э.Д. – СПб.: Крисмас+. - 1998. -735 с.
67. А.Д. Фролов. О применении прямого расчета поглощения ИК радиации к задаче определения общего содержания СО<sub>2</sub> в вертикальном столбе атмосферы: Труды Гго в. 369 / А.Д. Фролов, А.А. Шашков. – СПб.: Крисмас+. - 1976. - 211 с.



68. Howell Y.R. Solution of Thermal Transfer through Radiant Media Between Gray Walls / Howell Y.R., Permuter M. Monte Carlo // *Yourn. Heat Transfer*. - 1964. – P. 116-122.
69. Zanelly S. On the calculation of spatial temperature and radiative transfer in industrial watertube boiler/ Zanelly S., Corsi R., Rieri Y. // *Heat Transfer in Flames*. – Washington: Scripta Book Company, 1973. – P. 18-24.
70. Горелик Д.О. Экологический мониторинг. Оптико-электронные приборы и системы. Том 2 / Горелик Д.О., Конопелько Л.А., Панков Э.Д. – СПб.: Крисмас+. - 1998. – 592 с.
71. Кучерук В.Ю. Метод компенсації температурної похибки оптико-абсорбційних температурних перетворювачів концентрації газової суміші / В.Ю. Кучерук, І.А. Дудатьев // *Оптико електронні інформаційно-енергетичні технології*. - 2011. – №1 (21). – С. 163-167.
72. Rychkov A. D., Krasinskii D. V., Keino A. J., Salomatov V. V. Modeling the vortex furnace aero dynamics // *Proc. 4<sup>th</sup> Europ. Conf. on Industrial Furnace and Boilers*. Vol. 2. Portugal, Espinho-Porto. – 1997. – P.9.
73. Rychkov A. D., Filipov K. P. Numerical modeling of coal combustion processes in ecological clear circulating fluidized bed boiler units // *Proc. of 4th Intern. Korean Nat.Symp. on Sci. and Technologies KORUS 2000, Ulsan, 2000*. – Pt 1. – P.304–309.
74. Исаева Л.К. Контроль химических и биологических параметров окружающей среды / Под ред. Исаева Л.К. – СПб.: Эколого-аналитический информационный центр "Союз". - 1998. - 896 с.
75. Ю.К. Кривогузова. Исследование состава воздуха. Методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплине «Теплотехнические измерения и приборы» для студентов всех направлений Энергетического института / Ю.К. Кривогузова, И.П. Озерова. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2013. –15 с.
76. Ваня Я. Анализаторы газов и жидкостей / Я. Ваня. – М. : Энергия, 1970. – 552 с.
77. Еремина Б. Г. Газовый анализ / Б. Г. Еремина. – Л. : Гос. науч.-техн. из-во хим. литературы, 1955. – 380 с.
78. Примак А. В. Методы и средства контроля загрязнения атмосферы / А. В. Примак, А. Н. Щербань – К. : Наук. думка, 1980. – 296 с.
79. Кучерук В.Ю. Аналіз існуючих засобів вимірювання механічних характеристик електричних машин // *Вимірювальна техніка та метрологія /Кучерук В.Ю.* - Львів, №54. – 1999. - с. 125-138.
80. Моисеев В.С. Системное проектирование преобразователей информации / Моисеев В.С. – Ленинград: Машиностроение. Ленинградское отделение. - 1982. – 254 с.
81. Кормен, Т. Алгоритмы: построение и анализ / Кормен, Т., Лейзерсон, Ч., Ривест, Р., Штайн, К. - 2-е изд. — М.: Вильямс, 2005. — 1296 с. — ISBN 5-8459-0857-4.

82. Баркалов С.А. Методы агрегирования в управлении проектами / Баркалов С.А., Бурков В.Н., Гилязов Н.М. - М.: ИПУ РАН. - 1999. – 55 с.
83. Новиков Д.А. Сетевые структуры и организационные системы / Новиков Д.А. - М.: ИПУ РАН. -2003. – 102 с.
84. В. Я. Дремлюга. Методы компенсации температурной погрешности оптических сигнализаторов задымленности/ В. Я. Дремлюга, А. А. Дашковский, С. И. Еременко, С. В. Скицунов // МНПК «Современные информационные и электронные технологии», Одесса 27 — 31 мая. - 2013. - С 100 -101.
85. Remennyi M.A., Zotova N.V., Karandashev S.A., Matveev B.A., Stus' N.M., Talalakin G.N. // Sensors&ActuatorsB: Chemical. 2003. Vol. 91. N 1–3. P. 256–261.
86. Share S.W., Jonson T.J. et al. // Applied Spectroscopy. 2004.Vol. 58. N 12. - P. 1452–1460.
87. Matveev B.A. // Mid-infrared Semiconductor Optoelectronics. Springer, 2006. - P. 395–428.
88. Зотова Н.В., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М. // ФТП. - 2008. - Т. 42. - Вып. 6. - С. 641–656.
89. Матвеев Б.А., Закгейм А.Л., Зотова Н.В., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Черняков А.Е. // Тез. докл. XX Междунар. науч.-технич. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М. - 2008.
90. Патент РФ. Оптический газовый сенсор на основе иммерсионных диодных оптопар / Александров С.А., Гаврилов Г.А., Капралов А.А., Сотникова Г.Ю., Усачев С.А.; заяв.№ 2008 113124(014227) от 26.03.2008.
91. Режим доступа: <http://www.rusnano.com/>.
92. Залкинд И.Я. Зола и шлаки в котельных топках. / Залкинд И.Я., Вдовченко В.С., Дик Э.П. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 432 С.
93. Василевський О. М. Алгоритм оцінювання невизначеності у вимірюваннях при виконанні метрологічних робіт / О. М. Василевський // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2006. – № 3 (7). – С. 147–151.
94. Газоанализаторы АНК-АТ-310. Руководство по эксплуатации. Смоленск. – Аналитприбор, 2012. – 118 с.
95. Дунаев Б. Б. Точность измерений при контроле качества / Б. Б. Дунаев. – К. : Техніка, 1981. – 150 с.
96. Захаров И. П. Теория неопределенности в измерениях /И. П. Захаров, В. Д. Кукуш. – Харьков : Консум, 2002. – 256 с.
97. Техническая документация на ДМК 331. Режим доступа: [www.bdsensors.ua](http://www.bdsensors.ua)
98. Режим доступа: [www.thermoscientific.com](http://www.thermoscientific.com)
99. Режим доступа: [www.infraspek.ru](http://www.infraspek.ru)
100. Кучерук В.Ю. Система автоматического керування котельною установкою з контролем складу димових газів на основі оптико-абсорбційного

інфрачервоного метод / В.Ю. Кучерук, І.А.Дудатьєв // Наукові праці ВНТУ. – №3. – Вінниця, 2011. Режим доступу: [http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2011\\_3/2011-3.htm](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2011_3/2011-3.htm).

101. Кучерук В.Ю. Метод компенсації вологості димових газів котельних установок з покращеними метрологічними характеристиками / В.Ю. Кучерук, І.А.Дудатьєв // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – Вінниця, 2012. – №1. – С.74-78.

102. Кучерук В.Ю. Система забезпечення оптимального ККД роботи котельної установки характеристиками / В.Ю. Кучерук, І.А.Дудатьєв // Міжнародна науково-практична конференція “Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія”. – Вінниця, 2012. - С. 39.

103. Kucheruk V. Yu. Laboratory stand control composition smoke gases of caldron option / Kucheruk V. Yu., Dudatiev I. // Матеріали II Міжнародної конференції студентів і молодих науковців “Сучасні інформаційні технології 2012”. – Одеса, 2012. - С. 67-68.

104. Кучерук В.Ю. Лабораторний стенд контролю складу димових газів котельних установок / В.Ю. Кучерук, І.А.Дудатьєв // Тези доповідей десятої міжнародної науково-практичної конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)». – Вінниця, 2012. – 77 с.

105. Kucheruk V. Laboratory stand control composition smoke gases of caldron options / Kucheruk V., Dudatiev I. // VI International conference on optoelectronic information technologies “Photonics-ODS 2012”. - Vinnytsia, VNTU 2012. - P. 124

106. Kucheruk V. Optical-gas analysis absorption system with compensation of destabilizing factors / Kucheruk V. Yu., Dudatiev I. // VIII International salon of inventions and new technologies«New Time», september , 2012. – Sevastopol, 2012. – P.330-331.

107. Kucheruk V. Laboratory stand control composition smoke gases / Kucheruk V. Yu., Dudatiev I. // Міжнародна науково-технічна конференція ТЕХНОЛОГІЯ–2013. - Сєверодонецьк, 2013. - С. 94-95.

108. Кучерук В.Ю. Огляд методів контролю складу димових газів котельних установок / В.Ю. Кучерук, І.А.Дудатьєв // Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості. - №1(2). - 2013. – С. 50 – 59.

109. Kucheruk V. Automatic control of concentration of flue gases / Kucheruk V., Dudatiev I. // Pomiry avtovatyka kontrola. - № 7. – 2013. - P.621-623.

110. Kucheruk V. Physical nature metrological select of range of infrared waves to optical absorption methods of control flue gas boilers / Kucheruk V. Yu., Dudatiev I. // II International Scientific Conference in memory of Professor Vladimir Podzharenko Measurement, control and diagnosis in technical systems (MCDTS -2013). – Vinnitsya, 2013. – P. 26-27.

111. Кучерук В.Ю. Мікропроцесори в ІВТ. Лабораторний практикум у середовищі WinPLC7 з використанням ПЛК VIPA / В.Ю. Кучерук, В.М.

Севастьянов, І.А. Дудатьєв // Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 82 с.

112. Патент на корисну модель Кучерук В.Ю., Дудатьєв І.А. Оптико-абсорбційна система газового аналізу з компенсацією дестабілізуючих факторів U201202374 від 28.02.2012

113. Kucheruk V. Energi saving gas analysis systems with the use of software CFG/Kucheruk V. Yu., Dudatiev I. // IX International salon of inventions and new technologies «New Time» september. - Sevastopol, 2013. - p. 221-222.

114. Троян И. А. Влияние высокого давления на электронные, оптические и магнитные свойства диэлектриков с переносом заряда: дис. канд. физико-математических наук / Троян И. А. – Троицк, 2003. – 178с.

115. Азизов А.М. Точность измерительных преобразователей: монография / А.М. Азизов, А.Н. Гордов. – Л.: Энергия, 1975.

116. Daniel J. On the climate forcing of carbonmonoxide / Daniel J. , Solomon S. - J. Geophys.: Res. Atmos 103. -1998. - 13249–13260 p.

117. Анцыферов С.С. Общая теория измерений: учебное пособие / С.С. Анцыферов, Б.И. Голубь; под ред. Н.Н. Евтихеева. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007.

118. Dils B. Ground-based CO observations at Jungfraujoch // Comparison between FTIR and NDIR measurements / Dils B., Mahieu E., Demoulin P., Steinbacher M., Buchmann B., and De Maziere M. - 2009. - 154p.

119. Браславский, Д.А. Точность измерительных устройств / Д.А. Браславский, В.В. Петров. – М.: Машиностроение, 1976.

120. Ван-дер-Зил. Источники, описание, измерение / А. Ван-дер-Зил, А. Шум. – М.: Сов. радио, 1973.

121. Иванцов А.И. Основы теории точности измерительных устройств: учебное пособие для вузов / А.И. Иванцов. – М.: Изд-во стандартов, 1972.

122. Кунце Х.И. Методы физических измерений / Х.И. Кунце. – М.: Мир, 1989.

123. Duncan B. N. Global budget of CO, 1988–1997 // Source estimates and validation with a global model / Duncan B. N., Logan J. A., Bey I., Megretskaja I. A., Yantosca R. M., Novelli P. C., Jones N. B., and Rinsland C. P. - J. Geophys. Res. Atmos. 112, D22301, doi:10.1029/2007JD008459. - 2007.

124. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1991.

125. Подмастерьев К.В. Точность измерительных устройств: учебное пособие / К.В. Подмастерьев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Орел: ОрелГТУ, 2004.

126. Folini D. Lagrangian particle dispersion modeling for the high Alpine site Jungfraujoch / Folini D., Uhl S., and Kaufmann P. - J. Geophys. Res. Atmos., 113, D18111, doi:10.1029/2007jd009558. - 2008.

127. Пирс Дж. Символы, сигналы, шумы: закономерности и процессы передачи информации / Дж. Пирс. – М.: Мир, 1967.

128. Рей Ф. Статистическая физика / Ф. Рей. – М.: Наука, 1986.

129. Робинсон Ф.Н.Х. Шумы и флуктуации в электронных схемах и цепях / Ф.Н.Х. Робинсон. – М.: Атомиздат, 1980.
130. Романов В.Н. Анализ и обработка экспериментальных данных: учебное пособие / В.Н. Романов, В.В. Комаров. – СПб.: СЗТУ, 2002.
131. Романов, В.Н. Точность средств измерений: учебное пособие / В.Н. Романов. – СПб.: СЗТУ, 2003.
132. Фундаментальные проблемы теории точности: [монография] / под ред. В.П. Булатова, И.Г. Фридлендера. – СПб.: Наука, 2001.
133. А.М. Туричин . Электрические измерения неэлектрических величин/ А.М. Туричин, П.В. Новицкий, Е.С. Левшина и др.; под ред. П.В. Новицкого. – Л.: Энергия, 1975.
134. Вовна О.В. Комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система контролю концентрації метану у вугільних шахтах: дис. канд. техн. наук. / Вовна О.В. – Донецьк, 2009.
135. Гаврилов А.А. Программный комплекс "SigmaFlame" для моделирования топочных камер / Гаврилов А.А., Дектерев А.А., Тэпфер Е.С. и др. // Горение твердого топлива: тез. докл. VIII Всерос. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 13-16 нояб. 2012. - Новосибирск: Изд-во Ин-та теплофизики СО РАН, 2012. - С.43-44.
136. Майданик М.Н. Математическое моделирование топки и поворотного газохода котла П-50Р при совместном сжигании твердого и газообразного топлива / Майданик М.Н., Вербовецкий Э.Х., Дектерев А.А., Чернецкий М.Ю., Гаврилова А.А., Бойков Д.В., Бердин С.В. // Теплоэнергетика. - № 6. – 2011. - с. 37-42.
137. Chevalier A., Gheusi F., Atti'e, J., Zbinden R., Athier G., and Cousin J.: Carbon monoxide observations from ground stations in France and Europe and long trends in the free troposphere, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 8, 3313–3356. - 2008.
138. Daniel J. S. and Solomon S.: On the climate forcing of carbon monoxide, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 103, 13249–13260. - 1998.
139. Dils B., Mahieu E., Demoulin P., Steinbacher M., Buchmann B., and De Maziere M.: Ground-based CO observations at Jungfraujoch: Comparison between FTIR and NDIR measurements, in preparation. - 2009.
140. Duncan B. N., Logan J. A., Bey I., Megretskaia I. A., Yantosca R. M., Novelli P. C., Jones N. B., and Rinsland C. P.: Global budget of CO, 1988–1997: Source estimates and validation with a global model, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 112, D22301, doi:10.1029/2007JD008459. - 2007.
141. Ries L., Cemas D., and Jesenovec B.: Transport of nitrogen oxides, carbon monoxide and ozone to the Alpine Global Atmosphere Watch stations Jungfraujoch (Switzerland), Zugspitze and Hohenpeissenberg (Germany), Sonnblick (Austria) and Mt. Krvavec (Slovenia), *Atmos. Environ.*, 41, 9273–9287. - 2007.
142. Khalil M. A. K., Rasmussen R. A.: Carbon-Monoxide in the Earths Atmosphere – Indications of a Global Increase, *Nature*, 332, 242–245. - 1988.
143. Khalil M. A. K., Rasmussen R. A.: Global Decrease in Atmospheric Carbon-Monoxide Concentration, *Nature*, 370, 639–641. - 1994.

144. Levy H., Kasibhatla P. S., Moxim W. J., Klonecki A. A., Hirsch A. I., Oltmans S. J., and Chameides W. L.: The global impact of human activity on tropospheric ozone, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 791–794. - 1997.
145. Luterbacher J., Dietrich D., Xoplaki E., Grosjean M., Wanner H.: European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500, *Science*, 303, 1499–1503. - 2004.
146. Meszaros T., Haszpra L., Gelencser A.: Tracking changes in carbon monoxide budget over Europe between 1995 and 2000, *Atmos. Environ.*, 39, 7297–7306. - 2005.
147. Stemmler K., Zellweger C., Ridgeon P.: Two highspeed, portable GC systems designed for the measurement of non-methane hydrocarbons and PAN: Results from the Jungfrauoch High Altitude Observatory, *J. Environ. Monit.*, 6, 234–241. - 2004.
148. Wild O., Prather M. J.: Excitation of the primary tropospheric chemical mode in a global three-dimensional model, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 105, 24647–24660. - 2000.
149. Авдеева А.А. Хроматография в энергетике / А.А. Авдеева. - М.: Энергия. - 1980. – 271 с.
150. Андреев А.Н. Оптические измерения / Андреев А.Н., Гаврилов Е.В., Ишанин Г.Г., Кирилловский В.К., Прокопенко В.Т. - М.: Университетская книга Логос. - 2008. – 416с.
151. Дмитриев А.В. Очистка газовых выбросов ТЭС в аппаратах вихревого типа / А.В. Дмитриев, А.Н. Николаев, Н.А. Николаев // *Промышленная энергетика*. – 2006. - № 3.
152. Котлер В.Р. Промышленно-отопительные котельные: сжигание топлив и защита атмосферы / В.Р. Котлер, С.Е. Беликов –Санкт-Петербург: Энерготех. - 2001. – 272 с.
153. Rigby A. The most effective technology for NO<sub>x</sub> reduction in large combustion plants / A. Rigby, A. Klatt, T. Libuda, J. Zürbig – NOXCONF: International Conference on Industrial Atmospheric Pollution. - 2001.
154. Буренин В.В. Новые фильтры-пылеуловители для очистки и обезвреживания пылегазовоздушных выбросов ТЭС / В.В. Буренин // *Промышленная энергетика*. – 2010. - № 10. – с. 44-51.
155. Коньков О.А. Очистка газовых выбросов ТЭС от твердых частиц в вихревых аппаратах с форсунками ударного действия / О.А. Коньков, А.В. Дмитриев, А.Н. Николаев // *Промышленная энергетика*. – 2011. - № 6. – с. 46-48.
156. S. Garavaglia. A Heuristic Self-Organizing Map Trained Using the Tanimoto Coefficient. // *Proc. of International Joint Conference on Neural NetWorks*. Washington, DC. - 1998.
157. Shaidurov V.V. Multigrid Method for Finite Elements // *Mathematics and Its Applications*. Kluwer Academic Publishers. - 1995.

158. T. Honkela, S.K. Lagus, T. Kohonen. Exploration of Full-Text Databases with Self-Organizing Map // Proc. of International Conference on Neural NetWorks. Washington, DC. - 1996. - Vol.1. - P. 56-62
159. Контроль химических и биологических параметров окружающей среды / Под ред. Исаева Л.К. - СПб: Эколого-аналитический информационный центр "Союз", 1998. - 896 с.
160. Изерман Р. // Цифровые системы управления: Пер. с англ.- М.: Мир, 1984.- 541с.
161. Стенцель Й. І. Розробка моделі руху парамагнітного газу в неоднорідному термомагнітному полі: збірник наукових праць / Стенцель Й. І., Целіщев О. Б., Єлисеєв П. Й. // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг: КТУ (Криворізький технічний університет), 2003.- Випуск №2. - С. 101-103.
162. Большаков Г. Ф. Таблицы частот инфракрасных спектров гетероорганических соединений / Г. Ф. Большаков, Е. А. Глебовская. – Л. : Химия, 1968.– 132 с.
163. Лоусон К. Инфракрасные спектры поглощения неорганических веществ / К. Лоусон; пер. с англ. – М. :Мир, 1964. – 298 с.
164. В. А. Іщенко. Високочутливі засоби контролю малих концентрацій газів: [монографія] / В. А. Іщенко, В. Г. Петрук. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 138 с.
165. Combustion. Michael Biarnes in collaboration with: Bill Freed and Jason Esteves.E. Instruments International LLC.– 40 p.
166. Растринин Л.А. Адаптация сложных систем/ Растринин Л.А. - Рига: Зинатне, 1981. - 375 с.
167. В. Приміський. Інструментальний контроль концентрації димових газів і технологічна оптимізація процесів горіння / В. Приміський // Метрологія та прилади. - №1. -2011 – с. 61-67.
168. Справочник компании RIELLO. Азбука горения. On-line учебник <http://rielo.ru/>.
169. Яворский Б. М. Справочное руководство по физике для поступающих в вузы и для самообразования / Яворский Б. М., Селезнев Ю. А. - М.: Наука, 1989. - 576 с.
170. Стромберг А. Г. Физическая химия: Учеб. для хим. спец. вузов / Стромберг А. Г., Семченко Д. П. - М.: Высш. шк., 2009. — 527 с.
171. Матвеев Б.А. // Тез. докл. XX Междунар. науч.-технич. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения / Матвеев Б.А., Закгейм А.Л., Зотова Н.В., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Черняков А.Е. - М. - 2008.
172. С.Е. Александров. Моделирование характеристик оптических газовых сенсоров на основе диодных оптопар среднего ИК-диапазона спектра/ С.Е. Александров, Г.А. Гаврилов, А.А. Капралов, Б.А. Матвеев, Г.Ю. Сотникова, М.А. Ременный // Журнал технической физики.Том 79. -№ 6. -2009. – с. 112-118.

173. Зотова Н.В., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М. // ФТП. 2008. Т. 42. Вып. 6. С. 641–656.
174. В.Ю. Кучерук. Засіб вимірювання рівню молока для переносного доїльного апарату стійлової установки В.Ю. Кучерук, Є. А. Паламарчук, П. І. Кулаков, Т. В. Гнесь // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - № 3/9 ( 69 ). – Харків. – 2014. -С. 16-22. ISSN 1729-3774
175. М.Д. Аксененко. Микроэлектронные фотоприемные устройства / М.Д. Аксененко, М.Л. Бараночников, О.В. Смолин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.
176. Г.Г. Ишанин. Источники и приемники излучения: учебное пособие для студентов оптических специальностей вузов / Г.Г.Ишанин, Э.Д.Панков, А.Л.Андреев, Г.В.Польщиков.– СПб.: Политехника, 1991. – 240 с.
177. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Кузьмичев В.Е. – К.: Наук. Думка, 1989. – 864 с.
178. Вовна А.В. Алгоритм компенсации влияния пыли на точность измерения концентрации метана в угольной шахте / Вовна А.В., Хламов М.Г. // Наукові праці ДонНТУ. - Випуск 107. -С. 164-170.
179. А. Г. Лыков. Исследование влияния ширины спектра излучения источника на чувствительность измерительных каналов газоанализаторов выхлопных газов автомобильного транспорта / А.Г. Лыков, Н.П. Косарев // Наукові праці ДонНТУ. - №1(26). – 2014. -С.218-225. – ISSN 2075-4272
180. Lykov A.G. Analys is of gas analyzers of road transport exhaustand ways to improvetheir accuracy / Lykov, A.G., Vovna, A.V. // Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo tehnicnogouniversitytetu: Serija “Obchysljuval'na tehnika ta avtomatyzacija”. – №. 2(25). – 2013. – p. 246-253.
181. Vovna A.V. Methods and means of the gas components concentration and dust analyticalmeasuring in the mine atmosphere of coal mines / Vovna A.V., Zori A.A., Korenev V.D. and Hlamov M.G. – Donetsk, DonNTU – №. 1. – 2013. – p. 47-54.
182. Калниболотский Ю.М., Рысин В.С. Проектирование электронных схем. – К.: Техніка, 1976. – 144 с.
183. Кухарчук В. В. Оцінка статичних метрологічних характеристик опосередкованих вимірювань / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, В. О. Поджаренко // Вісник національного університету «Львівська політехніка». Серія «Автоматика, вимірювання та керування». – 2001. – № 420. – С. 37–45.
184. N. H. Ngo, D. Lisak, H. Tran, J.-M. Hartmann, "An isolated line-shape model to go beyond the Voigt profile in spectroscopic databases and radiative transfer codes", J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 89-100 (2013).
185. H. Tran, N. H. Ngo, J.-M. Hartmann, "Efficient computation of some speed-dependent isolated line profiles", J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 199-203 (2013).



186. H. Tran, N. H. Ngo, J.-M. Hartmann, Erratum to "Efficient computation of some speed-dependent isolated line profiles", *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 104 (2014).
187. J. Tennyson, P. F. Bernath, A. Campargue et al., "Recommended isolated-line profile for representing high-resolution spectroscopic transitions (IUPAC Technical Report)", *Pure Appl. Chem.*, 1931-1943 (2014).
188. A. L. Laraia, R. R. Gamache, J. Lamouroux, I. E. Gordon, L. S. Rothman, "Total internal partition sums to support planetary remote sensing", *Icarus*, 391-400 (2011).
189. L. S. Rothman, et al., "The HITRAN 2012 Molecular Spectroscopic Database", *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 4-50 (2013).
190. L. S. Rothman, I. E. Gordon, R. J. Barber, H. Dothe, R. R. Gamache, A. Goldman, V. Perevalov, S. A. Tashkun, J. Tennyson, "HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database", *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* 111, 2139-2150 (2010).
191. L. S. Rothman, R. B. Wattson, R. R. Gamache, J. Schroeder, and A. McCann, "HITRAN, HAWKS and HITEMP High-Temperature Molecular Database", *Proc. Soc. Photo Optical Instrumentation Engineers* 2471, 105-111 (1995).
192. Roman V. Kochanov HITRAN Application Programming Interface (HAPI) USA 2015, - 52 p.
193. Бёккер Ю. Спектроскопия. *Spektroskopie / Бёккер Ю.* - М.: Техносфера, 2009. — 528 с. — ISBN 978-5-94836-220-5.
194. Смит А. Прикладная ИК-спектроскопия: основы, техника, аналитическое применение / Смит А. — М.: Мир, 1982. — 328 с.
195. Bernath P. F. Infrared fourier transform emission spectroscopy (англ.) // *Chem. Soc. Rev.* — 1996. — Vol. 25. — P. 111—115. — DOI:10.1039/CS9962500111.
196. Bernath P. F. Infrared emission spectroscopy (англ.) // *Annu. Rep. Prog. Chem., Sect. C: Phys. Chem.* — 2000. — Vol. 96. — P. 177—224. — DOI:10.1039/B001200I.
197. *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry / Lindon J.* — 2nd Ed. — Academic Press, 2010. — 3312 p.
198. Larkin P. J. *Infrared and raman spectroscopy: principles and spectral interpretation.* — Elsevier, 2011. — 230 p. — ISBN 978-0-12-386984-5.
199. Noda I. Two-Dimensional Infrared (2D IR) Spectroscopy: Theory and Applications (англ.) // *Applied Spectroscopy.* — 1990. — Т. 44. — № 4. — С. 550—561.
200. Stuart B. H. *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications.* — Wiley, 2004. — 242 p.
201. J. Hildenbrand. Micromachined mid-infrared emitter for fast transient temperature operation for optical gas sensing system / J. Hildenbrand, A. Kurzinger, C. Peter, E. Moreton, J. Wollenstein, F. Numann, M. Ebert, and J. Korvic. - in Proc. 7-th IEEE SENSORS. - Lecce, Italy. - Oct. 2008. - p. 297–300.

## ДОДАТКИ

### Додаток А

Результати вимірювання напруги, тиску та температури за допомогою лабораторного зразка системи контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок

Номер вимірювання	Температура, °С	Тиск (надлишковий), кПа	Напруга. В
1	97.90	0.05	3.78
2	98.01	0.06	3.78
3	97.99	0.05	3.78
4	98.22	0.07	3.78
5	97.99	0.05	3.79
6	98.30	0.05	3.79
7	97.91	0.05	3.79
8	97.99	0.06	3.78
9	97.90	0.04	3.78
10	98.01	0.05	3.78
11	97.99	0.05	3.78
12	98.22	0.06	3.78
13	97.99	0.05	3.78
14	98.77	0.07	3.78
15	98.22	0.05	3.79
16	97.99	0.05	3.79
17	98.77	0.05	3.79
18	97.91	0.06	3.79
19	97.91	0.04	3.78
20	97.9	0.05	3.78
21	97.85	0.06	3.78
22	97.83	0.05	3.78
23	98.22	0.05	3.78
24	97.99	0.07	3.78
25	98.45	0.05	3.78
26	98.22	0.05	3.79
27	97.99	0.05	3.79
28	98.71	0.06	3.79
29	98.50	0.06	3.79
30	98.39	0.05	3.78
31	98.71	0.07	3.78
32	98.01	0.05	3.78
33	97.99	0.05	3.78
Середнє значення	98.059	0.053	3.783

## Додаток В

Лістинг програми контролю концентрації концентрації двоокису вуглецю у  
димових газах котельних установок

```
CALL FC105
IN:=PIW768

HI_LIM:=20.00
LO_LIM:=0.00
BIPOLAR:=FALSE
RET_VAL:=MW0
OUT:=MD0
A BR
JNB _001
L MD 0
L MD 1
+R
T MD 2
AN OV
SAVE
CLR
_001 :A BR
JNB _002
L MD 1
L 2.718
*R
T MD 3
AN OV
SAVE
CLR
_002 :A BR
JNB _003
L MD 3
L MD 4
*R
T MD 5
AN OV
SAVE
CLR
_003 :A BR
JNB _004
L MD 5
L MD 2
/R
T MD 6
_004 :NOP 0
A(
L MD 6
L 12.00
<=R
)
```

Додаток К  
Зовнішній вигляд лабораторного зразка

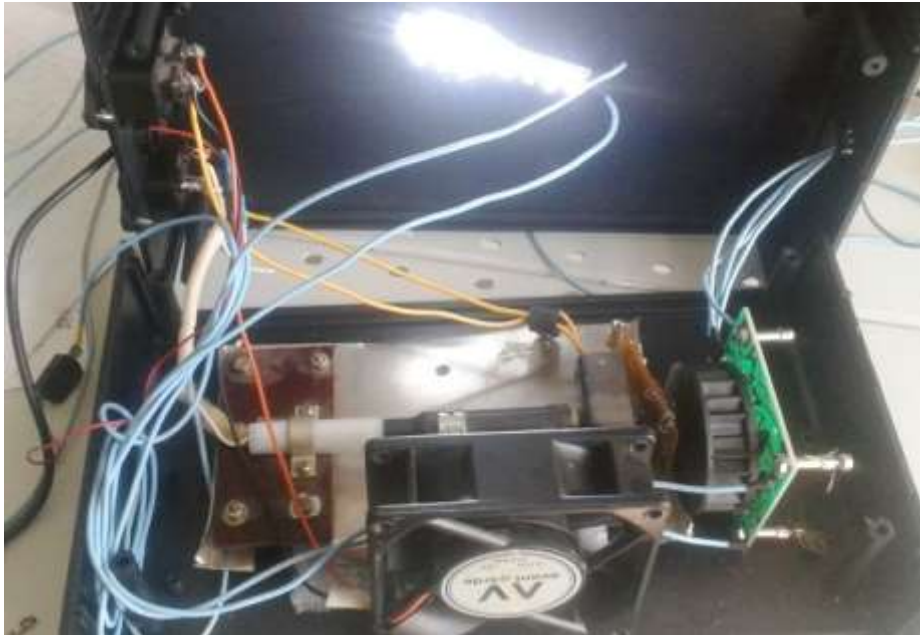


Рис. К.1. Лабораторний зразок засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок (внутрішній блок)



Рис. К.2. Лабораторний зразок засобу контролю концентрації двоокису вуглецю у димових газах котельних установок (зовнішній блок)

Додаток Л  
Спектри поглинання, ФР, ФД, характеристики ІЧ випромінювачів

Таблиця Л.1 – Смуги поглинання основних димових газів

Газ \ довжина смуги поглинання	Пари води H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
Сильні смуги, мкм	2,66; 2,73; 6,27; 8,8	2,688; 2,765; 4,267; 14,98; 9,13– 11,67	4,5; 7,78	3,31
Середні смуги, мкм	2–4,3	2,7; 7,44; 13,9	2,87; 3,87; 4,06; 4,39; 7,69	
Слабкі смуги, мкм		4,82; 5,18; 9,425; 10,41	2,97; 3,57; 5,36; 8,57	2,15; 5,8; 6,45; 7,54

Таблиця Л.2 – Характеристики ІЧ випромінювачів

Тип лазера	Діапазон покриття довжин хвиль, мкм
Напівпровідниковий діодний	<1–34
З перевертанням спіна	5–6
Нелінійно-оптичні пристрої, в т.ч.: параметричний генератор світла генератор різницевої частоти пристрій на основі змішування 2-х частот пристрій на основі змішування 4-х частот	9–14
	<1–11
	3–6
	9–11
Газові на ефекті Зеемана CO <sub>2</sub> -лазер високого тиску	2–24
	3–9
	9–11

Таблиця Л.3 – Параметри фоторезисторів

Тип фоторезистора	Робоча температура, °С	Спектральний діапазон чутливості, мкм	Чутливість, см·Гц <sup>1/2</sup> /Вт	Стала часу, мксек
PbS	25	0,72–4,7	1·10 <sup>12</sup>	5–1000
PbS	-78	0,72–5,5	2,5·10 <sup>12</sup>	1000–3000
PbS	-196	0,72–5,9	1,5·10 <sup>13</sup>	250–3000
PbTe	-196	0,72–6,0	(5–8)·10 <sup>9</sup>	<30
PbSe	-196	0,72–6,5	1,5·10 <sup>9</sup>	10–40
InSb (n-тип)	-196	0,72	3·10 <sup>7</sup>	2–5
InSb (p-тип)	-196	0,72	(0,8–4)·10 <sup>8</sup>	2–5
InSb (вентильний)	-196	0,72–7,0	2·10 <sup>10</sup>	1–2
Ge: Au	-196	0,72–11,0	2·10 <sup>10</sup>	-
Ge: Au, Sb	-196	0,72–6,0	2·10 <sup>10</sup>	-
Ge: Au, Zn	-223	0,72–45	4·10 <sup>9</sup>	0,01

id	name	formula	bands	lines	WN <sub>min</sub> , cm <sup>-1</sup>	WN <sub>max</sub> , cm <sup>-1</sup>	S <sub>min</sub> , cm/mol	S <sub>max</sub> , cm/mol	S <sub>v</sub> , cm/mol
1	Water vapour	H <sub>2</sub> O	728	224515	0 007002	25710 82500	1 393e-37	2 651e-18	7 374e-17
2	Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	4064	471847	0 736369	12784 056441	3 934e-35	3 543e-18	1 132e-16
4	Nitrous oxide	N <sub>2</sub> O	351	47843	0 838022	7796 633110	1 229e-28	1 004e-18	7 191e-17
5	Carbon monoxide	CO	49	4606	3 462498	8464 801965	1 378e-56	4 461e-19	1 020e-17
5	Methane	CH <sub>4</sub>	334	468013	0 001063	11501 872500	1e-37	2 114e-19	1 783e-17
8	Nitrogen oxide	NO	293	105079	0 000001	9273 214340	1 451e-95	2 322e-20	4 735e-18
9	Sulfur dioxide	SO <sub>2</sub>	20	95121	0 017394	4092 948220	3 301e-30	4 851e-20	4 010e-17
10	Nitrogen dioxide	NO <sub>2</sub>	11	104223	0 497999	3074 152650	4 24e-28	1 302e-19	6 232e-17

Рис. Л.1. Основні димові гази котельних установок

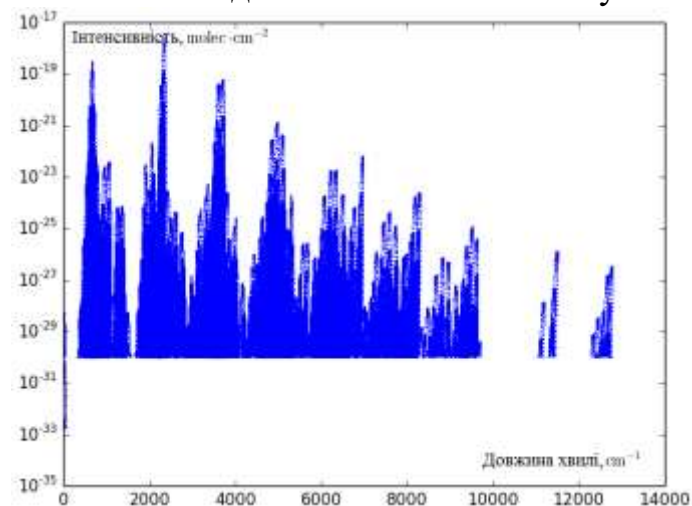


Рис. Л.2. Спектр поглинання CO<sub>2</sub> у діапазоні 0.75-15 мкм

Додаток М  
Математичні розрахунки метрологічних характеристик засобу контролю у  
пакеті Maple V.14

$I0 := 3 \cdot 10^{-3}; L := 0.1; n := 12; U0 := 5.5; K := 11.022; S := 2.6 \cdot 10^{-5}; M := 44;$

$$I0 := \frac{3}{1000}$$

$L := 0.1$

$n := 12$

$U0 := 5.5$

$K := 11.022$

$S := 0.00002600000000$

$M := 44$

$$> N_{xx} := \frac{I0 \cdot \exp\left(-\frac{0.0083 \cdot K \cdot C \cdot T \cdot L}{M \cdot P}\right) \cdot S \cdot Sio \cdot Rzz \cdot (2^n - 1)}{U0};$$

$$N_{xx} := 0.00005807454545 e^{-\frac{0.0002079150000 C T}{P}} Sio Rzz$$

$> restart;$

$$> Nx(C, T, P, Sio, Rzz) := \frac{I0 \cdot \exp\left(-\frac{0.0083 \cdot K \cdot C \cdot T \cdot L}{M \cdot P}\right) \cdot S \cdot Sio \cdot Rzz \cdot (2^n - 1)}{U0};$$

$$Nx := (C, T, P, Sio, Rzz) \rightarrow \frac{I0 e^{-\frac{(-1) \cdot 0.0083 K C T L}{M P}} S Sio Rzz (2^n - 1)}{U0}$$

$$> Iout(C, T, P) := I0 \cdot \exp\left(-\frac{0.0083 \cdot K \cdot C \cdot T \cdot L}{M \cdot P}\right); Ux(C, T, P, Sio, Rzz) := I0 e^{-\frac{(-1) \cdot 0.0083 K C T L}{M P}} S Sio Rzz;$$

$$Iout := (C, T, P) \rightarrow I0 e^{-\frac{(-1) \cdot 0.0083 K C T L}{M P}}$$

$$Ux := (C, T, P, Sio, Rzz) \rightarrow I0 e^{-\frac{(-1) \cdot 0.0083 K C T L}{M P}} S Sio Rzz$$

$>$

$plot(Nx(Cx, 293, 101325, 5.6, 9.88 \cdot 10^6), Cx = 182950 .. 365900); plot(Nx(Cx, 293, 101325, 5.6, 9.88 \cdot 10^6), Cx = 0 .. 182950); plot(Iout(C, 293, 101325, 5.6, 9.88 \cdot 10^6), C = 182950 .. 365900); plot(Iout(C, 293, 101325, 5.6, 9.88 \cdot 10^6), C = 0 .. 182950); plot3d(Iout(182950, Tx, Px), Tx = 380 .. 480, Px = 95000 .. 105000); plot(Ux(Cx, 293, 101325, 5.06, 9.88 \cdot 10^6), Cx = 182950 .. 365900); plot(Ux(Cx, 293, 101325, 5.06, 9.88 \cdot 10^6), Cx = 182950 .. 182950); plot3d(Ux(182950, Tx, Px, 5.06, 9.88 \cdot 10^6), Tx = 380 .. 480, Px = 95000 .. 105000);$

$$SI := (C, T, P, Sio, Rzz) \rightarrow \frac{\partial}{\partial C} Nx(C, T, P, Sio, Rzz)$$

$$SIx := -\frac{1.207456912 \cdot 10^{-8} T e^{-\frac{0.0002079150000 C T}{P}} Sio Rzz}{P}$$

$$> S2(C, T, P, Sio, Rzz) := \frac{\partial}{\partial T} Nx(C, T, P, Sio, Rzz); S2x := \frac{\partial}{\partial T} Nx(C, T, P, Sio, Rzz);$$

$$S2 := (C, T, P, Sio, Rzz) \rightarrow \frac{\partial}{\partial T} Nx(C, T, P, Sio, Rzz)$$



Підписано до друку 24.06.2021. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний

Умовн. друк. арк. 7,09. Обл. вид. арк. 4,84. Зам. № 89020

Наклад 50 прим.

Видавець «ФОП Середняк Т.К.», 49000, Дніпро, 18, а/с 1212

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру  
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 4379 від  
02.08.2012.

Ідентифікатор видавця в системі ISBN 8010

49000, Дніпро, 18, а/с 1212

тел. (096)-308-00-38, (056)-798-04-00

E-mail: 7980400@gmail.com

Віддруковано на базі поліграфічно-видавничого центру «Арбуз»

49000, Дніпро, 18, а/с 1212

тел. (066)-55-312-55, (056)-798-22-47

E-mail: arbuz.in.ua@gmail.com

[www.arbuz.in.ua](http://www.arbuz.in.ua)