

ОПТИЧНИЙ БЕЗПІЛОТНИЙ ЗАСІБ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ У МІСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ

¹Вінницький національний технічний університет

Висвітлено результати комплексного дослідження, спрямованого на розробку інноваційного оптичного безпілотного засобу, який забезпечує оперативний контроль якості атмосферного повітря в реальних умовах урбанізованого середовища. Основний акцент поставлено на застосуванні інфрачервоного оптико-абсорбційного методу, який дозволяє селективно й чутливо виявляти концентрації ключових газів-забруднювачів — вуглекислого газу (CO_2), чадного газу (CO), метану (CH_4), сірчистого ангідриду (SO_2) та діоксиду азоту (NO_2).

У дослідженні детально проаналізовано джерела, концентраційні межі та екологічні наслідки присутності цих газів у міському повітрі. Обґрунтовано вибір оптимальних смуг поглинання для кожного з газів на основі спектроскопічних даних з бази HITRAN, що дало змогу підвищити точність і селективність вимірювань. Запропоновано та реалізовано структурну схему сенсорного модуля, що включає джерело ІЧ-випромінювання, фотоприймач, оптичну систему та стабілізовану антивібраційну платформу, адаптовану для встановлення на БПЛА типу квадрокоптер.

Математична модель функціонування сенсора базується на законі Бугера–Ламберта–Бера та враховує вплив температури, тиску, висоти над рівнем моря, довжини оптичного шляху та параметрів поглинання. Особливу увагу приділено залежності вихідної напруги фотодіода від концентрації досліджуваного газу, що дозволяє здійснювати точну кількісну оцінку.

Результати експериментів, проведених у місті Вінниці, підтвердили стабільну роботу пристрою за різних атмосферних умов та достовірність вимірюваних значень CO_2 . Отримані концентрації перебувають у межах, характерних для міського повітря, що свідчить про релевантність та практичну цінність розробленого засобу.

У підсумку доведено ефективність використання мобільного оптичного сенсора на базі БПЛА для екологічного моніторингу в умовах міста. Окреслено перспективи вдосконалення системи шляхом реалізації мультигазового аналізу, впровадження бездротової передачі даних та інтеграції у smart-системи управління міським середовищем.

Ключові слова: оптичний сенсор, інфрачервоне випромінювання, CO_2 , CO , CH_4 , SO_2 , NO_2 , абсорбційна спектроскопія, моніторинг повітря, HITRAN, Бугер–Ламберт–Бер, екологічний контроль.

Вступ

У сучасних умовах стрімкої урбанізації, розширення промислової інфраструктури та зростання транспортного навантаження міста дедалі частіше зіштовхуються з проблемою перевищення допустимих концентрацій небезпечних газів у повітрі. Найпоширенішими компонентами міського забруднення є [1] вуглекислий газ (CO_2), чадний газ (CO), метан (CH_4), сірчистий ангідрид (SO_2) та діоксид азоту (NO_2), які становлять серйозну загрозу для здоров'я населення, екосистем і кліматичної стабільності.

Традиційні стаціонарні системи моніторингу, хоча і забезпечують базовий рівень спостереження, але не відповідають вимогам швидкості, точності та просторової гнучкості, особливо в умовах щільної забудови. Їх низька мобільність, залежність від наземної інфраструктури та висока вартість суттєво обмежують можливості оперативного екологічного реагування.

У цьому контексті особливу актуальність набуває застосування оптичного безпілотного засобу для дистанційного контролю якості повітря. Інтеграція інфрачервоного оптико-абсорбційного ме-

тоту в бортові системи БПЛА відкриває нові можливості для високочутливого й селективного виявлення забруднювачів у реальному часі. Завдяки своїй мобільності, точності та здатності охоплювати великі площі, такий засіб стає ефективним інструментом екологічного моніторингу в складних умовах міського середовища.

Метою роботи є розробка, теоретичне обґрунтування та експериментальна перевірка оптичного безпілотного засобу для екологічного моніторингу атмосферного повітря в умовах урбанізованого середовища. Зокрема, дослідження спрямоване на застосування інфрачервоного оптико-абсорбційного методу для визначення концентрацій основних газів-забруднювачів (CO_2 , CO , CH_4 , SO_2 , NO_2) з урахуванням впливу зовнішніх факторів, що дозволяє забезпечити високу точність, мобільність та адаптивність до реальних міських умов.

Постановка задачі

У проаналізованих джерелах [2]—[5] основна увага приділяється створенню математичних моделей оптико-абсорбційного методу для визначення концентрацій газів у повітрі та їх комп'ютерному моделюванню. Зазвичай такі дослідження мають суто теоретичний характер або обмежуються перевіркою результатів у лабораторних умовах, де зовнішні чинники — температура, вологість, атмосферний тиск — або строго контролюються, або зовсім не враховуються.

На відміну від переважно теоретичних або лабораторно орієнтованих досліджень, у цій роботі акцентовано на проведенні натурних експериментів у реальних умовах урбанізованого середовища. Такий підхід дозволяє не лише перевірити працездатність розробленого оптичного безпілотного засобу, а й оцінити його адаптованість до впливу неконтрольованих зовнішніх факторів — таких як коливання температури, атмосферного тиску, вологості, вібрації. Отримані результати відображають реальні умови експлуатації пристрою, забезпечуючи об'єктивнішу і всебічну оцінку його точності, стабільності та ефективності. Це, у свою чергу, підвищує прикладну значущість дослідження та відкриває перспективи для практичного впровадження у міських системах екологічного моніторингу.

Результати дослідження

Перед апаратною розробкою оптичного безпілотного засобу як інструмента для екологічного моніторингу доцільно розглянути основні забруднювачі атмосферного повітря в міському середовищі — їхнє походження, типові концентрації та вплив на довкілля і здоров'я населення.

Вуглекислий газ (CO_2) є індикатором антропогенного навантаження, утворюється під час повного згоряння викопного палива, а також у процесі дихання живих організмів. У міському повітрі його концентрація становить 430...460 ppm. Хоча CO_2 не є токсичним, він відіграє ключову роль у зміні клімату, тому важливий для спостереження в системах моніторингу.

Чадний газ (CO) — безбарвний і без запаху токсичний газ, що виникає внаслідок неповного згоряння палива. Найвищі концентрації (до 10 ppm і більше) спостерігаються в районах інтенсивного автомобільного руху. CO знижує здатність крові переносити кисень, що вимагає його оперативного виявлення в системах екологічного моніторингу.

Метан (CH_4) — важливий парниковий газ, що з'являється через витоки з газових мереж, сміттєзвалищ та теплоелектростанцій. Типова концентрація в міському повітрі становить 1,8...2,5 ppm. Завдяки високій чутливості оптичних сенсорів безпілотники можуть виявляти навіть незначні витоки метану, що є важливим для запобігання загрозам.

Сірчистий ангідрид (SO_2) виникає під час спалювання сірковмісного палива, особливо в застарілому енергетичному обладнанні. Його вміст у повітрі нечасто перевищує 50 ppm, однак навіть такі концентрації можуть спричиняти подразнення слизових оболонок. Моніторинг SO_2 є критичним для запобігання кислотним дощам та хронічним захворюванням дихальних шляхів.

Діоксид азоту (NO_2) утворюється під час високотемпературного згоряння палива, особливо в транспортному секторі. У міському повітрі його рівень коливається в межах від 20 до 100 ppm. Цей токсичний газ бере участь у формуванні фотохімічного смогу, тому його оперативне виявлення за допомогою безпілотних платформ дозволяє своєчасно реагувати на пікові навантаження.

Таким чином, впровадження оптичного безпілотного засобу дає змогу отримувати оперативну картину забруднення атмосферного повітря, що є основою для ухвалення екологічно обґрунтованих управлінських рішень.

Для подальшого аналізу використовуємо спектри поглинання зазначених газів, використовуючи

дані бази HITRAN [2], яка надає вичерпну інформацію щодо процесів поглинання, випромінювання та взаємодії молекул з електромагнітним випромінюванням у широкому спектральному діапазоні.

Проаналізувавши ІЧ-спектральний діапазон, можна зробити висновок, що для CO₂ оптимальна довжина хвилі — 4,267 мкм (щоб уникнути накладання з водяною парою); для CO — 4,67 мкм (чітка та селективна смуга); для CH₄ доцільно вибрати 7,66 мкм (щоб уникнути ділянки з H₂O поблизу 3,3 мкм); для SO₂ — 8,69 мкм (найвиразніша та унікальна); для NO₂ — 6,19 мкм (сильна й без значного перекриття). Результати аналізу подано в таблиці.

Аналіз смуг поглинання CO₂, CO, CH₄, SO₂, NO₂

Об'єкт (газ)	Центр смуги (мкм)	Частота (см ⁻¹)	Інтенсивність	Накладання	Примітка
CO ₂	4,267	~2342	Сильна	Ні	Оптимальна смуга
	2,688	~3723	Дуже сильна	H ₂ O	Найінтенсивніша, але з накладанням
CO	4,67	~2130	Сильна	Ні	Висока селективність
CH ₄	3,31	~3020	Сильна	Часткове	Інтенсивна, але частково перекривається з H ₂ O
	7,66	~1305	Середня	Ні	Альтернативна смуга
SO ₂	8,69	~1151	Дуже сильна	Ні	Найкраща для селективного контролю
NO ₂	6,19	~1615	Сильна	Ні	Висока інтенсивність, добра селективність

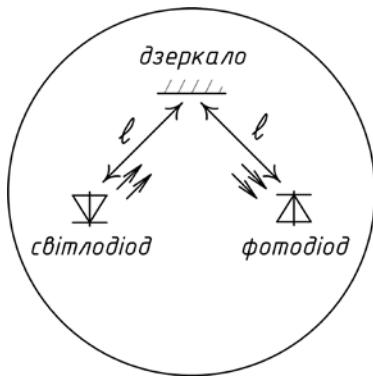


Рис. 1. Структурна схема чутливого елемента оптичного сенсора

Математично в основі роботи засобу вимірювання концентрації лежить відомий закон Бугера–Ламберта–Бера, який описує зв'язок інтенсивності опромінення, що пройшло через атмосферне повітря, з концентрацією досліджуваного газу. Як джерело ІЧ випромінювання використано світловипромінювальний діод. Структурну схему чутливого елемента оптичного сенсора показано на рис. 1.

Завдяки сучасним світлодіодам з вузьким спектром показник розсіювання у законі Бугера–Ламберта–Бера зникає [3], тоді

$$I_l = I_0 \cdot e^{-k_a C l}, \quad (1)$$

де I_0 — початкова інтенсивність опромінення; C — концентрацією досліджуваного газу; l — довжиною шляху поглинання; k_a — показники поглинання.

У монографії [3] детально описано математичний перехід від загального показника поглинання k_a до коефіцієнта поглинання $k_a(\lambda)$ у певному спектральному діапазоні (використавши закон Клапейрона–Менделєєва та прийнявши нормальні умови відповідно до рекомендацій International Union of Pure and Applied Chemistry)

$$k_a = k_a(\lambda) \frac{8333,3 \cdot T}{P_a}, \quad (2)$$

де T — температура газової суміші; P_a — абсолютний тиск газової суміші.

$k_a(\lambda)$ виразимо сумою коефіцієнтів поглинання окремих ліній у робочому спектральному діапазоні [4]

$$k_a(\lambda) = \sum_i \frac{S(\lambda_i)}{\pi} \cdot \frac{\sigma}{\sigma^2 + \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_i} \right)^2}, \quad (3)$$

де $S(\lambda_i)$ — інтенсивність або сила лінії поглинання з резонансною довжиною хвилі λ_i ; $\sum_i S(\lambda_i)$ — сума по всіх лініях поглинання i ; λ та λ_i — довжина та центр (резонансна довжина) смуги поглинання; σ — ширина смуги поглинання (пов'язана з ефектами розширення: тиском, температурою тощо). Тоді

$$k_a = \sum_i \frac{S(\lambda_i)}{\pi} \cdot \frac{\sigma}{\sigma^2 + \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_i}\right)^2} \cdot \frac{8333, (3) \cdot T}{P_a} \quad (4)$$

У рамках цього дослідження абсолютний тиск доцільно представити через атмосферний, оскільки об'єктом моніторингу є екологічний стан атмосферного повітря в умовах міського середовища

$$P_a = P_{atm} - \rho \cdot g \cdot h, \quad (5)$$

де P_{atm} — атмосферний тиск, ρ — густина (щільність) газів, g — прискорення вільного падіння, h — абсолютна висота.

Виразивши густину газу через молярну масу газу та підставивши (5) у (4) та (4) у (1), вигляд математичної моделі буде таким:

$$I_l = I_0 \cdot e^{\left(\sum_i \frac{S(\lambda_i)}{\pi} \cdot \frac{\sigma}{\sigma^2 + \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_i}\right)^2} \right) \cdot \frac{8333, (3) \cdot T}{P_{atm} / \left(1 + \frac{M \cdot g \cdot h}{R \cdot (T + 273,15)}\right)} \cdot C \cdot l}, \quad (6)$$

де M — молярна маса газів; R — універсальна газова стала.

У роботі [5] подано результати досліджень фотоелектричного вимірювального перетворення інтенсивності опромінення — напруга

$$U_F = I_l \cdot S_{I0} \cdot S \cdot R_{ZZ}, \quad (7)$$

де U_F — вихідна напруга фотоелектричного вимірювального перетворювача; S — площа фоточутливого шару фотоприймача; S_{I0} — інтегральна струмова чутливість фотодіоду за немодульованого опромінення; R_{ZZ} — опір в колі зворотного зв'язку операційного підсилювача.

В результаті, врахувавши результати наукових праць [3]—[5] та підставивши (6) у (7), а також врахувавши довжину шляху оптичного променя («світлодіод—дзеркало» — «дзеркало—фотодіод») отримаємо, що вихідна напруга є функцією вимірюваної фізичної величини

$$U_F = I_0 \cdot e^{\left(\sum_i \frac{S(\lambda_i)}{\pi} \cdot \frac{\sigma}{\sigma^2 + \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_i}\right)^2} \right) \cdot \frac{8333, (3) \cdot T}{P_{atm} / \left(1 + \frac{M \cdot g \cdot h}{R \cdot (T + 273,15)}\right)} \cdot C \cdot 2l} \cdot S_{I0} \cdot S \cdot R_{ZZ}. \quad (8)$$

Розроблений безпілотний засіб призначений для здійснення оперативного моніторингу складу атмосферного повітря на різних висотах та в різних ділянках міської забудови. Основним елементом вимірювального модуля є оптичний газовий сенсор, змонтований на стабілізованій антивібраційній платформі.

Основні компоненти засобу екологічного моніторингу якості повітря у міському середовищі є:

- БПЛА типу квадрокоптер — забезпечує мобільність, стабільність польоту та можливість завісання у потрібній зоні дослідження;
- оптичний сенсор — змінний сенсор оптичного типу, встановлений на друкованій платі. У залежності від завдань моніторингу можливе використання альтернативних сенсорів для інших газів (у нашому експериментальному дослідженні сенсор CO_2);
- стабілізуювальна платформа — друкована плата з сенсором, встановлена на спеціальній віброізоляційній пластині, що знижує вплив механічних коливань під час польоту;
- електроживлення — газовий сенсор отримує живлення безпосередньо від основного акумулятора БПЛА через стабілізуювальний перетворювач, що підтримує оптимальні параметри напруги для функціонування газоаналізатора.

Під час польоту БПЛА здійснює забори повітря в реальному часі. Оптичний сенсор аналізує концентрацію заданого газу, використовуючи метод інфрачервоного поглинання. Отримані дані зберігаються локально (в перспективі планується передавання даних по бездротовому каналу на наземну станцію). Варто зазначити, що процес вимірювання концентрації газу відбувається у статичному режимі: квадрокоптер зависає на заданій висоті у визначеній точці простору. Такий підхід дозволяє мінімізувати вплив повітряних потоків, спричинених рухом апарата, а також зменшити механічні вібрації, які можуть спотворити точність вимірювань. Стабільне положення в повітрі

сприяє більшій точності та повторюваності результатів, особливо у випадках вимірювання малих концентрацій забруднювальних речовин.



Рис. 2. Апаратне виконання оптичного безпілотного засобу (по каналу CO_2)

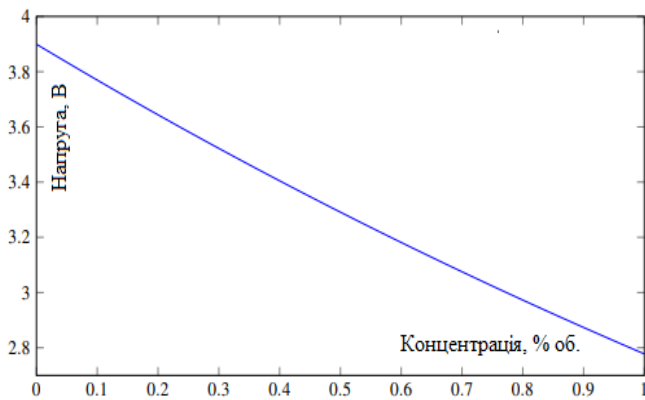


Рис. 3. Моделювання математичної залежності (8) напруга-концентрація (по каналу CO_2)

Завдяки змінному сенсорному блоку, система є модульною і може адаптуватися до вимірювання різних забруднювальних речовин, що актуально для екологічного моніторингу в умовах міста. Апаратне виконання оптичного безпілотного засобу (зі змінним сенсорним каналом вимірювання концентрації CO_2) показано на рис. 2.

Моделювання математичної залежності (8) напруга-концентрація (по каналу CO_2) в робочому (міському) діапазоні зміни вихідної величини показано на рис. 3.

Експериментальні дослідження розробленого засобу вимірювання концентрації газів (по каналу CO_2) проводилися на території Вінницького національного технічного університету в період доби з 8⁰⁰ до 14⁰⁰, на абсолютній висоті від 1 до 10 метрів. При цьому температура змінювалась в межах 14...18 °C, а тиск залишався майже сталим від 98300 до 98900 Па. Експериментально виміряні значення концентрації CO_2 такі (% об.): 0,042; 0,044; 0,044; 0,044; 0,044; 0,045; 0,045; 0,044; 0,044; 0,044.

Отже, за результатами експериментального дослідження можна підсумувати, що отримані значення концентрації вуглекислого газу (CO_2) узгоджуються з середньостатистичними міськими рівнями, характерними для умов урбанізованого середовища.

Висновки

У результаті виконаного дослідження розроблено та експериментально апробовано оптичний безпілотний засіб для екологічного моніторингу атмосферного повітря у міському середовищі. Основним елементом вимірювального модуля виступає інфрачервоний оптико-абсорбційний сенсор, реалізований на стабілізованій платформі та встановлений на борту БПЛА типу квадрокоптер.

Здійснено комплексний аналіз характеристик основних газів-забруднювачів (CO_2 , CO , CH_4 , SO_2 , NO_2) та обґрунтовано вибір оптимальних смуг поглинання на основі даних бази HITRAN, що забезпечує високу селективність та чутливість при вимірюванні. Розроблено математичну модель, яка описує залежність вихідної напруги сенсора від концентрації газу згідно з законом Бугера–Ламберта–Бера, з урахуванням атмосферних параметрів.

Натурні експериментальні дослідження, проведені в реальних міських умовах, продемонстрували стабільну роботу пристрою, підтвердили достовірність отриманих результатів та відповідність виміряних концентрацій CO_2 типовим міським рівням. Це свідчить про ефективність і практичну придатність розробленого засобу для оперативного, мобільного моніторингу якості повітря в умовах урбанізованого середовища.

Отримані результати відкривають перспективи подальшої модернізації системи, зокрема впровадження мультигазового аналізу, дистанційної передачі даних та інтеграції в міські екологічні платформи моніторингу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. Р. Козубовський, «Оптичні прилади газового аналізу для контролю забруднення атмосферного повітря», *Металургія та прилади*, № 2, с. 62-70, 2010.
- [2] O. Vasilevskyi, I. Dudatiev, and K. Ovchynnykov, "Tool control the concentration of carbon dioxide in the flue gas boilers based on the optical absorption method," *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, vol. 9, pp. 30-34, 2019. <https://doi.org/10.35784/iapgos.232>.
- [3] В. Г. Петрук, *Спектрофотометрія світлорозсіювальних середовищ*. УНІВЕРСУМ-Вінниця: ВНТУ, 2000, 207 с.
- [4] І. А. Дудатьєв, С. В. Мальцев, і М. О. Притула, «Дослідження коефіцієнта поглинання CO₂ у агресивних газових середовищах», *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, № 351 (3.1), с. 157-162, 2025. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-19>.
- [5] V. Podzharenko, and P. Kulakov, "Photoelectric angle converter," *Proceedings of the SPIE*, vol. 4425, pp. 42-459, 2001.

Рекомендовано кафедрою інформаційних радіоелектронних технологій і систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 18.06.2025

Мальцев Сергій Васильович — аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, e-mail: s.maltsev1999@gmail.com ;

Дудатьєв Ігор Андрійович — канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, e-mail: dudatiev.igor@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

S. V. Maltsev¹
I. A. Dudatiev¹

Optical Unmanned Aerial System for Environmental Air Quality Monitoring in Urban Environments

¹Vinnytsia National Technical University

This article presents the results of a comprehensive study, aimed at the development of an innovative optical unmanned aerial system designed for real-time air quality monitoring in urban environments. The main focus is on the application of the infrared optical absorption method, which allows for selective and sensitive detection of key air pollutants — carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO), methane (CH₄), sulfur dioxide (SO₂), and nitrogen dioxide (NO₂).

The study thoroughly analyzes the sources, typical concentration ranges, and environmental impacts of these gases in urban air. The optimal absorption bands for each gas were selected based on spectroscopic data from the HITRAN database, which improved the accuracy and selectivity of measurements. A structural diagram of the sensor module is proposed and implemented, including an IR radiation source, photodetector, optical system, and a stabilized anti-vibration platform adapted for installation on a quadcopter-type UAV.

The sensor's mathematical model is based on the Beer–Lambert–Bouguer law and considers the influence of temperature, pressure, altitude, optical path length, and absorption parameters. Special attention is given to the relationship between the output voltage of the photodiode and the gas concentration, enabling precise quantitative analysis.

Experimental studies conducted in Vinnytsia confirmed the stable performance of the device under various atmospheric conditions and the reliability of the CO₂ concentration measurements. The recorded concentrations were within typical urban air levels, indicating the adequacy and practical value of the developed system.

In conclusion, the efficiency of using a mobile optical sensor based on UAV for environmental air monitoring in urban settings is substantiated. Prospects for system enhancement are outlined, including the implementation of multi-gas analysis, wireless data transmission, and integration into smart urban environmental monitoring platforms.

Keywords: optical sensor, infrared radiation, CO₂, CO, CH₄, SO₂, NO₂, absorption spectroscopy, air monitoring, HITRAN, Beer–Lambert–Bouguer law, environmental control.

Maltsev Serhii V. — Post-Graduate Student of the Chair of Information Radioelectronic Technologies and Systems, e-mail: s.maltsev1999@gmail.com ;

Dudatiev Ihor A. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, e-mail: dudatiev.igor@gmail.com