

# ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 004.75

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/14>**Богдан Г.А.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Глуценко М.О.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ГАЗОВІ СЕНСОРИ: СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Розвиток промисловості суттєво збільшив кількість шкідливих викидів у атмосферу, що суттєво впливає на стан екології, а отже і на здоров'я людей. Це робить актуальним впровадження автоматизованих систем контролю якості повітря на підприємствах енергетичного комплексу, видобувної та переробної промисловості, частка викиду у атмосферу шкідливих речовин яких складає до 90% від загальної кількості викидів в атмосферу. Перелік шкідливих речовин, наявність і концентрація яких підлягає обов'язковому контролю, досить значний і включає в себе: оксиди азоту  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $N_2O$ ; монооксид вуглецю  $CO$ , вуглекислий газ (діоксид вуглецю)  $CO_2$ , оксид сірки  $SO_2$ , вуглеводневі гази ( $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$  та інші), тверді частки речовин у повітрі.

Відповідно системи моніторингу якості повітря повинні мати розгалужену систему сенсорів, які здатні визначати наявність в повітрі всіх цих речовин. Використання різних, за принципом роботи, типів датчиків дозволяє значно розширити моніторинг даних в рамках різноманітних виробничих задач та процесів. Для масового застосування сучасні датчики повинні бути дешевими, надійними, енергозберігаючими та мати значний термін працездатності.

У цій статті ми розглянули основні типи сенсорів в залежності від фізичного принципу покладеного в основу їх роботи. Визначили, що для адекватної оцінки ефективності методів виявлення газу слід враховувати такі показники, як: чутливість, селективність, час спрацьовування, енергоспоживання, оборотність, собівартість виготовлення. Було визначено, що серед газових датчиків, яким притаманна оборотність, найчастіше в системах моніторингу якості повітря використовують напівпровідникові, електрохімічні та оптичні сенсори.

В статті розглянуто переваги та недоліки кожного з типів сенсорів, області їх застосування, перспективи розвитку. Проведений огляд показав, що напівпровідникові сенсори мають високу чутливість, але їх термін служби і висока робоча температура призводять до високих експлуатаційних витрат. Існуючі електрохімічні датчики по своїм характеристикам суттєво поступаються іншим розглянутим типам сенсорів.

Оптичні датчики широко представлені на ринку, мають широкий діапазон співвідношення ціни та якості в залежності від експлуатаційних потреб та термін служби понад 10 років. По своїм характеристикам сенсори виконані з використанням методу  $NDIR$  найбільш перспективні для систем моніторингу якості повітря.

**Ключові слова:** сенсор, системи моніторингу повітря, автоматизація, надійність, діагностика.

**Постановка проблеми.** Розвиток промисловості суттєво збільшив кількість викидів шкідливих речовин у атмосферу, що суттєво впливає на стан екології, а отже і на здоров'я людей. Статистичні дослідження показали, що за останні двадцять років, кількість смертей, викликана шкід-

ливими викидами у повітря, збільшилась більше ніж в два рази [1]. На сучасних підприємствах, дотримання екологічної безпеки відповідно до існуючих міжнародних стандартів [2] є важливим завданням. Особливо це актуально для підприємств енергетичного комплексу, видобувної

та переробної промисловості, частка викиду у атмосферу шкідливих речовин яких складає до 90% від загальної кількості викидів в атмосферу.

Відповідно до [3, 4] найчастіше контролюють наявність і концентрацію у повітрі наступних речовин: оксиди азоту NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O; монооксид вуглецю CO, вуглекислий газ (діоксид вуглецю) CO<sub>2</sub>, оксид сірки SO<sub>2</sub>, вуглеводневі гази (CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> та інші), тверді частки речовин у повітрі.

Рішення такої задачі, досягається за рахунок впровадження автоматизованих систем моніторингу якості повітря. Важливою складовою таких систем є газові сенсори, які дозволяють визначити наявність та концентрації шкідливих домішок у повітрі [3]. Використання різних, за принципом роботи, типів датчиків дозволяє значно розширити моніторинг даних в рамках різноманітних виробничих задач та процесів [5–6]. Для масового застосування сучасні датчики повинні бути дешевими, надійними, енергозберігаючими та мати значний термін працездатності. З оглядом на сучасні потреби виробництва, сенсори повинні мати можливість простого інтегрування в IoT системи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз сучасних публікацій показав, що з кожним роком ринок сенсорів, які використовуються для визначення наявності шкідливих речовин у повітрі, збільшується і по прогнозам аналітиків на 2025 рік сягне одного трильйону доларів [4]. Відповідно до [3–8] перевага віддається датчикам з нижчим енергоспоживанням та з можливістю безпроводного включення у системи моніторингу повітря [4]. В роботах [9–13] приведені основні характеристики напівпровідникових газових сенсорів, зазначені їх переваги та недоліки та перспективи їх розвитку. Публікації [14–16] присвячені електрохімічним сенсорам, а [17–20] оптичним.

Усі розглянуті публікації не враховують те, що по своїм технічним характеристикам не всі датчики можуть бути впровадженні в системи моніторингу якості повітря. Тому актуальним є розгляд сучасних сенсорів контролю промислових викидів в контексті автоматизованих систем моніторингу якості повітря.

**Постановка завдання.** Мета цієї статті – огляд сучасних сенсорів, які використовуються для контролю промислових викидів в атмосферу в сучасних автоматизованих системах.

**Виклад основного матеріалу.** Принцип роботи сенсора впливає на перелік речовин, які він може визначати. Крім того, для оцінки ефективності методів виявлення газу слід враховувати наступні показники [7]:

- 1) чутливість: мінімальне значення об'ємної концентрації газів, при якій відбувається спрацювання сенсора;
- 2) селективність: можливість газових датчиків, з достатньою достовірністю, ідентифікувати конкретний газ серед газової суміші;
- 3) час спрацювання сенсору;
- 4) споживання енергії;
- 5) оборотність: чи можуть чутливі матеріали повернутися у вихідний стан після виявлення;
- 6) вартість виготовлення.

Класифікація сенсорів, що використовуються для контролю промислових викидів в атмосферу, в залежності від фізичного принципу покладеного в основу їх роботи, приведено в таблиці 1 [4, 8]. В даній класифікації враховані лише ті сенсори, яким притаманна оборотність.

Таблиця 1

**Класифікація газових сенсорів**

| Тип сенсора        | Принцип роботи   | Викиди, які контролює  |
|--------------------|--|--|
| Напівпровідниковий | Використовують зміну електричного опору напівпровідника при взаємодії з газом                | чадний газ (CO), метан (CH <sub>4</sub> ), водень (H <sub>2</sub> ), аміак (NH <sub>3</sub> )        |
| Електрохімічний    | Генерують електричний сигнал у відповідь на хімічну реакцію між газом та реагентом в сенсорі | токсичні гази, такі як CO, SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub>   |
| Оптичний           | Вимірюють зміни у світлових характеристиках, коли світло взаємодіє з газом                   | Можуть використовуватися для широкого спектру газів, залежно від налаштувань і типу оптичного методу |

**Напівпровідникові газові сенсори**

Напівпровідникові газові сенсори широко використовуються для виявлення горючих та деяких токсичних газів у повітрі (горючий газ, природний газ, зріджений нафтовий газ, водень, озон, оксид вуглецю, аміак, бензол, сірководень, леткі органічні речовини (VOC)). Принцип дії напівпровідникових сенсорів заснований на зміні провідності чутливого шару сенсору, що відбувається за рахунок адсорбції молекул газу на його поверхні при взаємодії сенсора з аналізованим газовим середовищем [9–10]. В якості аналітичного вихідного сигналу використовують або опір чутливого елементу, або аналоговий сигнал напруги.

Сенсори отримали широке розповсюдження через простоту виготовлення. Їх конструкція включає підложку, на яку наносять вимірювальні

електроди, чутливий та нагріваючий елементи. Для забезпечення працездатності датчиків, необхідно нагрівати напівпровідниковий шар до температури 150–600 °С. Так для сенсорів з чутливим елементом виконаним на базі CdO/ZnO, максимальна чутливість до бутану досягається при температурі 300 °С [9]. Робочі характеристики сенсора залежать від матеріалу чутливого шару (хімічний склад, кристалічна будова, геометричні розміри, адсорбційно/десорбційні властивості, каталітична активність, термодинамічна стабільність), матеріалів та геометрії нагріваючого та вимірювального електродів.

В якості чутливого елемента і напівпровідникових газових сенсорів використовують [10]:

- 1) метал оксидні напівпровідникові матеріали (SnO<sub>2</sub>, ZnO, та ін.);
- 2) двовимірні матеріали (графен);
- 3) вуглецеві нанотрубки (одновимірний матеріал);
- 4) напівпровідникові матеріали з широкою забороненою зоною (SiC, GaN).

На сьогоднішній день, близько 90% всіх напівпровідникових газових сенсорів виготовляється на основі метал оксидних напівпровідникових матеріалів.

Так як, взаємодія молекул газу із сенсором відбувається переважно на поверхні, а отже, кількість поверхневих атомів чутливого елемента відіграє у роботі датчика важливу роль, то перспективним є використання в конструкції сенсорів одновимірних та двовимірних матеріалів, у якості чутливого шару. Так з роботи [9] видно, що сенсори на основі наностержнів ZnO показали високу чутливість (10 ppm) та швидкий відгук на бензол та етанол. Крім того, використання таких матеріалів дозволяє не лише підвищити селективність та чутливість напівпровідникових газових сенсорів, а і суттєво знизити робочу температуру, що, в свою чергу, зменшує енергію споживання, а отже сприяє збільшенню довговічності датчиків. В таблиці 2 наведені деякі характеристики для сенсорів з чутливим елементом на основі вуглецевих нанотрубок.

Таблиця 2

**Робочі характеристики напівпровідникових газових сенсорів з чутливим елементом на основі вуглецевих нанотрубок**

| Газ, який контролюється | Діапазон концентрацій газу | Робоча температура, °С | Література |
|-------------------------|----------------------------|------------------------|------------|
| CO                      | 10–50 ppm                  | 150                    | [11]       |
| NH <sub>3</sub>         | 60–800 ppm                 | 25                     | [12]       |
| NO <sub>2</sub>         | 0.01–10 ppm                | 25                     | [13]       |

До переваг напівпровідникових сенсорів відносять:

- можливість виявлення низьких концентрацій шкідливих речовин (<ppm),
- швидкодія,
- мініатюрні розміри,
- низька вартість,
- простота виготовлення.

Основним недоліком даного типу сенсорів є їх низька селективність, що обмежує області їх застосування в автоматизованих системах.

**Електрохімічні сенсори**

Електрохімічні датчики широко використовуються для виявлення токсичних газів, таких як CO, H<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> і інших. Їх широке розповсюдження в автоматизованих системах контролю моніторингу якості повітря обумовлено низьким енергоспоживанням, коротким часом реагування (відгуку), високою чутливістю до певного компонента середовища та широким діапазоном визначення концентрацій [4]. При стандартних умовах експлуатації (робоча температура 25°С та тиск навколишнього середовища в межах 20% від стандартного) термін служби електрохімічного датчика становить приблизно один рік [9].

Узагальнена схема електрохімічного сенсора приведена на рис. 1.

По суті, електрохімічні датчики представляють собою герметичний корпус, всередині якого розміщені два або три електроди (опорний, робочий, допоміжний) та іонний провідник між ними (рис. 1). Вимірювальний електрод відповідає за проведення окислювально-відновлювальної реакції, яка відбувається на його поверхні [15]. Потенціал вимірювального електрода щодо допоміжного визначається електронним пристроєм. Величина потенціалу вибирається таким чином, щоб забезпечити оптимальний режим протікання електрохімічної реакції речовини, що визначається. На допоміжному електроді, зазвичай, протікає реакція електровідновлення кисню повітря. Струм, який при цьому виникає пропорційний концентрації газу, що аналізується.

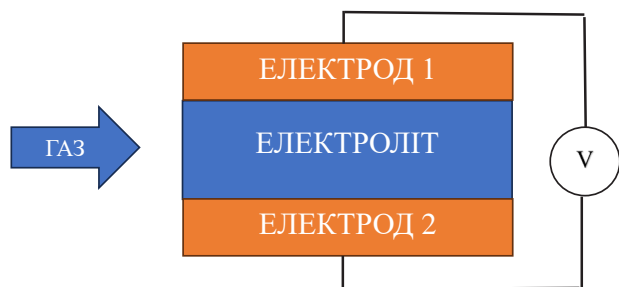


Рис. 1. Узагальнена схема електрохімічного сенсора

В електрохімічному сенсорі з двома електродами, допоміжний електрод виконує одночасно і функцію порівняльного електроду. Така конструкція дозволяє суттєво знизити затрати на виробництво сенсорів.

Для детектування двох газів одночасно, розроблені газові електрохімічні сенсори з чотирма електродами [16].

Для забезпечення селективності датчика до обраного компоненту, необхідно застосовувати фільтри, які найчастіше розташовують у кришці сенсора. Вибір фільтра визначається умовами (складом аналізованого газового середовища), в яких працюватиме електрохімічні сенсори. Наприклад, для визначення CO датчик забезпечують фільтром, що поглинає NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S.

В сенсорах використовують інертні, хімічно активні чи модифіковані, і навіть іоноселективні електроди. Електроліти можуть бути рідкими (розчини H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) або твердими (ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CsHSO<sub>4</sub> та ін.).

В залежності від способу вимірювання корисного сигналу електрохімічні сенсори бувають двох типів:

1. Амперометричні – вимірюється струм, що виникає від дії потенціалу прикладеного до вимірювальної комірки сенсора. Сила струму пропорційна концентрації вимірювального газу. До переваг відносять високу точність вимірювання. Недоліки: недовговічність, малий діапазон вимірювальних концентрацій, високе енергоживлення, залежність вимірювального сигналу від розмірів поверхні, де відбувається окислювально-відновлювальна реакція.

2. Потенціометричні – електрохімічний ланцюг, в якому наявність вимірювального компоненту в газовій суміші викликає зміну різниці потенціалів між робочим електродом та електродом порівняння. Переваги: не потребує зовнішнього джерела живлення; не залежить від розмірів електродів, що дозволяє суттєво зменшити їх розміри; широкий діапазон вимірювальних концентрацій (3–4 порядки); оборотність реакції. Недоліки: невисока точність вимірювання.

На сьогоднішній день досить широко застосовуються в системах моніторингу якості повітря, за рахунок високої вибірковості, чутливості, можливості визначення хімічних компонентів в широкому діапазоні значень, швидкодії, стабільній роботі сенсора при низьких концентраціях вимірювального газу. До недоліків слід віднести: неповна селективність до вимірюваного компоненту; зменшення чутливості з часом; більшість

датчиків не можуть працювати в середовищі без кисню; сильна температурна залежність та чутливість до атмосферного тиску; не можуть працювати при низьких температурах (нижче 30 °C); на ресурс впливає сумарний час впливу вимірювального газу.

### Оптичні газові сенсори

Основна перевага оптичних газових сенсорів полягає в безконтактному способі визначення концентрації детектованого газу. Відповідно до класифікації приведеної в роботі [17] можна виділити три основні методи, які використовують в датчиках: флуоресцентний, адсорбційний та комбінаційного розсіювання.

Найбільш широке поширення в наш час одержали оптичні сенсори, які реалізують адсорбційний оптичний метод, а саме недисперсійний інфрачервоний метод (NDIR) [14, 17, 18, 19]. Це обумовлено тим, що такі датчики забезпечують: високу чутливість, стабільність робочих характеристик на протязі довгого періоду часу, короткий час відгуку, селективність до обраного газу.

Робота NDIR датчиків ґрунтується на законі поглинання Ламберта-Бера і полягає в реєстрації зміни інтенсивності випромінювання, що взаємодіє з досліджуванним газом на деяких характерних для нього довжинах хвиль. Виділення робочого діапазону довжин хвиль із широкосмугового спектру випромінювача здійснюється за допомогою інтерференційних фільтрів або за рахунок використання дискретного випромінювання на певній довжині хвилі.

В таблиці 3 наведено довжини хвиль, що характерні для деяких газів.

Таблиця 3

Довжини хвиль поглинання газів

| Газ             | Довжина хвилі поглинання (мкм) | Довжина хвилі, яка зазвичай використовується в сенсорах (мкм) | Література |
|-----------------|--------------------------------|---|------------|
| NO <sub>2</sub> | 4,51~4,56                      | 4,52  | [20]       |
| SO <sub>2</sub> | 4,0~4,17;<br>7,25~7,5          | 7,3   | [19]       |
| CO <sub>2</sub> | 2,75~2,8;<br>4,26~4,3          | 4,27  | [19]       |
| NO              | 5,24~5,28                      | 5,25  | [20]       |
| CO              | 4,5~4,7                        | 4.66  | [19]       |

Основними конструктивними елементами оптичного інфрачервоного сенсора є: джерело та приймач випромінювання, робоча камера, селективний фільтр та плата обробки сигналу. Найчастіше використовують двоканальну схему



вимірювання із застосуванням вимірювального та опорного (порівняльного) каналів.

Відсутність прямого контакту газової суміші з джерелом та приймачем випромінювання оптичних сенсорів дозволяє використовувати їх в агресивних середовищах. Датчики здатні працювати в температурному діапазоні від  $-60$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ , що суттєво розширює область використання. Однією з основних переваг сенсорів виготовлених на основі оптичного методу NDIR є їх тривалий термін служби, який становить понад 10 років [14].

До недоліків відносять:

1) проблеми з селективністю, які виникають через завади від прилеглих газів;

2) підвищена вартість через дуже складні оптичні компоненти.

На основі проведеного аналізу, можна зробити висновок, що відсоток використання оптичних сенсорів в системах моніторингу якості повітря щороку збільшується. Розвиток даного типу датчиків направлено у бік мінімізації габаритних розмірів, здешевлення оптичних схем та зменшення енергоспоживання.

Як видно, розглянуті типи газових сенсорів мають, як переваги, так і недоліки. В таблиці 4 наведено порівняння їх основних характеристик в чотирьох бальній системі оцінювання: 4 – відмінно; 3 – добре; 2 – задовільно; 1 – погано.

З даних приведених в таблиці 4, можна зробити висновок, що перспективним для систем моніторингу якості повітря є використання оптичних сенсорів, які мають більш високу довговічність, точність, селективність та чутливість в порівнянні з напівпровідниковими та електрохімічними сенсорами. Хоча з точки зору собівартості та часу відгуку кращі характеристики мають напівпровідникові датчики. Крім того при виборі сенсорів слід комплексно оцінювати технічні характеристики кожного з сенсорів і обирати найбільш оптимальний варіант в кожній конкретній задачі.

**Висновки.** Використання автоматизованих систем моніторингу шкідливих викидів в атмосфері є дуже важливим завданням. Моніторинг

Таблиця 4

**Порівняння характеристик напівпровідникових, електрохімічних та оптичних газових сенсорів**

| Параметр                    | Тип газового сенсору |                 |          |
|-----------------------------|----------------------|-----------------|----------|
|                             | Напів-провідниковий  | Електрохімічний | Оптичний |
| чутливість                  | 4                    | 3               | 4        |
| точність                    | 3                    | 3               | 4        |
| селективність               | 2                    | 3               | 4        |
| час відгуку                 | 4                    | 2               | 2        |
| стабільність                | 4                    | 1               | 4        |
| довговічність               | 3                    | 2               | 4        |
| ціна                        | 4                    | 3               | 2        |
| розміри                     | 4                    | 3               | 4        |
| моніторинг у реальному часі | 3                    | 1               | 4        |

у реальному часі вимагає ефективної системи датчиків, що забезпечують безперервне зчитування даних контролю без збільшення експлуатаційних витрат. Ринок газових сенсорів достатньо різноманітний, але проведений огляд показав, що найчастіше в таких системах використовують три типи сенсорів: напівпровідникові, електрохімічні та оптичні, тому що по своїм технічним характеристикам (ціна, надійність, енергоспоживання, чутливість, оборотність та інше) вони більш перспективні.

Проведений огляд показав, що напівпровідникові сенсори мають високу чутливість, але їх термін служби і висока робоча температура призводять до високих експлуатаційних витрат. Існуючі електрохімічні датчики по своїм характеристикам суттєво поступаються іншим розглянутим типам сенсорів.

Оптичні датчики широко представлені на ринку, мають широкий діапазон співвідношення ціни та якості в залежності від експлуатаційних потреб та термін служби понад 10 років. По своїм характеристикам сенсори виконані з використанням методу NDIR найбільш перспективні для систем моніторингу якості повітря.

**Список літератури:**

1. Fuller R, Landrigan PJ, Balakrishnan K, et al. Pollution and health: a progress update. *Lancet Planetary Health*. 2022. № 6. P. 535–547. DOI: 10.1016/S2542-5196(22)00090-0
2. ДСТУ ISO 14001:2015 Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 14001:2015, IDT) [Чинний від 01.07.2016]. Вид. офіц. Київ, 2016. 30 с.
3. Богдан Г.А., Глущенко М.О. Загальні тенденції побудови автоматизованих систем моніторингу якості повітря на промислових підприємствах *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Том. 34 (73), № 4. С. 12–17. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.4/03
4. Shivani Dhall, B.R. Mehta, A.K. Tyagi, Kapil Sood, A review on environmental gas sensors: Materials and technologies. *Sensors International*. Volume 2, 2021, ISSN 2666-3511, DOI: 10.1016/j.sintl.2021.100116.

5. Mohd Javaid, Abid Haleem, Ravi Pratap Singh, Shanay Rab, Rajiv Suman, Significance of sensors for industry 4.0: Roles, capabilities, and applications. *Sensors International*. Volume 2, 2021, ISSN 2666-3511, DOI: 10.1016/j.sintl.2021.100110.
6. Kalsoom, Tahera & Ramzan, Naeem & Ahmed, Shehzad & Ur Rehman, Masood. Advances in Sensor Technologies in the Era of Smart Factory and Industry 4.0. *Sensors*. 2020. 20. 6783. DOI: 10.3390/s20236783
7. Liu, Xiao & Cheng, Sitian & Liu, Hong & Hu, Sha & Zhang, Daqiang & Ning, Huansheng. A Survey on Gas Sensing Technology. *Sensors (Basel, Switzerland)*. 2012. 12. 9635-65. DOI:10.3390/s120709635.
8. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Дудник Д.П. Методи вимірювання концентрації газів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія "Технічні науки"*. 2011. № 6. С. 55-58.
9. Goel, Neeraj & Kunal, Kishor & Kushwaha, Aditya & Kumar, Mahesh. Metal oxide semiconductors for gas sensing. *Engineering Reports*. 2022. 5. DOI: 10.1002/eng2.12604
10. Raju, Parameswari & Li, Qiliang. Review—Semiconductor Materials and Devices for Gas Sensors. *Journal of The Electrochemical Society*. 2022. 169. DOI: 10.1149/1945-7111/ac6e0a.
11. E.H. Espinosa, R. Ionescu, B. Chambon, G. Bedis, E. Sotter, C. Bittencourt, A. Felten, J.-J. Pireaux, X. Correig, E. Llobet, Hybrid metal oxide and multiwall carbon nanotube films for low temperature gas sensing. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2007. Volume 127, Issue 1. Pages 137-142, ISSN 0925-4005, DOI: 10.1016/j.snb.2007.07.108.
12. Hieu, Nguyen & Thuy, Luong & Chien, Nguyen. Highly sensitive thin film NH<sub>3</sub> gas sensor operating at room temperature based on SnO<sub>2</sub>/MWCNTs composite. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 129, 2008, Pages 888-895. DOI:10.1016/j.snb.2007.09.088
13. Gaikwad S., Bodkhe G., Deshmukh M., Rushi A., Shirsat M.D. Chemiresistive sensor based on polythiophene-modified single-walled carbon nanotubes for detection of NO<sub>2</sub>. *Modern Phys. Lett. B*. 2015. V. 29. № 6. DOI:10.1142/S0217984915400461
14. Cepa JJ, Pavón RM, Caramés P, Alberti MG. A Review of Gas Measurement Practices and Sensors for Tunnels. *Sensors (Basel)*. 2023 Jan 17;23(3):1090. DOI: 10.3390/s23031090.
15. Wenjian, Zhang & Chen, Xinyi & Xing, Yingying & Chen, Jingqiu & Guo, Lanpeng & Huang, Qing & Li, Hua-Yao & Liu, Huan. Design and Construction of Enzyme-Based Electrochemical Gas Sensors. *Molecules*. 29. 5. 2023. DOI:10.3390/molecules29010005
16. Baron, Ronan & Saffell, John. Amperometric Gas Sensors as a Low Cost Emerging Technology Platform for Air Quality Monitoring Applications: A Review. *ACS Sensors*. 2017. DOI: 10.1021/acssensors.7b00620
17. Козубовський В. Р. Оптичні прилади газового аналізу для контролю забруднення атмосферного повітря (огляд). *Науковий вісник Ужгородського університету : Серія: Фізика*. 2009. Вип. 26. С. 61–87.
18. Popa, D.; Udrea, F. Towards Integrated Mid-Infrared Gas Sensors. *Sensors* 2019, 19, 2076. DOI:10.3390/s19092076
19. Xiao, Ning & Li, Weichao & Tian, Yuewei & Wang, Weijun & Yuan, Chao. Infrared Gas Sensor Based on MEMS Technology for Gas Detection. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. 2785. 012103. DOI:10.1088/1742-6596/2785/1/012103.
20. Wojtas, Jacek & Mikolajczyk, Janusz & Bielecki, Zbigniew. Aspects of the Application of Cavity Enhanced Spectroscopy to Nitrogen Oxides Detection. *Sensors (Basel, Switzerland)*. 2013. 13. DOI: 7570-98. 10.3390/s130607570.

#### **Bohdan H.A., Hlushchenko M.O. CURRENT STATUS AND FUTURE PROSPECTS OF GAS SENSORS**

Industry development has significantly increased harmful emissions into the atmosphere, adversely affecting the environment and human health. This highlights the urgent need for automated air quality control systems in enterprises within the energy complex and mining and processing industries, where harmful substance emissions can account for up to 90% of total atmospheric emissions. The list of deleterious substances subject to mandatory control is extensive and includes nitrogen oxides (NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O), carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), sulfur oxides (SO<sub>2</sub>), hydrocarbon gases (such as CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), and solid particles in the air.

Consequently, air quality monitoring systems must be equipped with a comprehensive array of sensors capable of detecting the presence of these substances. The use of various types of sensors, each operating on different principles, significantly enhances data monitoring across a range of production tasks and processes. For mass application, modern sensors must be affordable, reliable, energy-efficient, and have a long service life.

This article examined the main types of sensors based on the physical principles underlying their operation. It was also determined that an adequate assessment of the effectiveness of gas detection methods should take into account indicators such as sensitivity, selectivity, operation time, energy consumption, reversibility, and production cost. It was established that among the reversible gas sensors, semiconductor, electrochemical, and optical sensors are the most commonly used in air quality monitoring systems.

The article examines the advantages and disadvantages of each type of sensor, along with their areas of application and development prospects. The review indicated that semiconductor sensors exhibit high sensitivity; however, their limited service life and high operating temperatures contribute to increased operating costs. Based on their characteristics, existing electrochemical sensors are significantly inferior to the other types of sensors considered.

Optical sensors are widely represented on the market, offering a broad range of price-to-quality ratios depending on operational needs, with a service life exceeding 10 years. Given their characteristics, sensors utilizing the NDIR method are the most promising option for air quality monitoring systems.

**Key words:** sensor; air monitoring systems, automation, reliability, diagnostics.