

## АНАЛІТИЧНЕ ТА ЕКОЛОГІЧНЕ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК 543.271.3

### ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУМ'ЯНО-ІОНІЗАЦІЙНОГО ДЕТЕКТОРА

Івасенко В. М.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,  
м. Київ, Україна

E-mail: [kpi\\_naeps@ukr.net](mailto:kpi_naeps@ukr.net)

У статті висвітлено питання вимірювання концентрації вуглеводнів в атмосфері автозаправних станцій (АЗС). Залежно від умов і задач контролю, застосовують різні методи газового аналізу, в даній публікації проаналізовано найбільш чутливий – полум'яно-іонізаційний метод. Представлені результати теоретичних розрахунків і експериментальних досліджень основних метрологічних характеристик полум'яно-іонізаційний детектора (ПД): функції перетворення, чутливості, значенню граничної чутливості, лінійному діапазону перетворення детектора, величині фоновому струму і рівню флуктуаційних шумів. Обґрунтовано вибір режимів витрат водню, повітря проби на вихідний сигнал.

**Ключові слова:** вуглеводні, детектор, випаровування, газоаналізатор, пальник, електрод, аналіз.

#### Вступ

Вуглеводні ( $C_nH_m$ ) є одним з основних компонентів – забруднювачів атмосфери, які справляють негативний вплив на людину і довкілля [1]. Значна кількість вуглеводнів потрапляє в довкілля з відпрацьованими газами транспортних заходів: автомобілів, літаків, тепловозів, сільськогосподарських і дорожніх машин, теплоходів, і т.д. [2]. Вуглеводневі випаровування є характерним супутником роботи АЗС. За даними досліджень з кожної АЗС в довкілля за рік випаровується від 5,0 до 9,0 тон палива [3,4,5].

Вимірювання концентрації вуглеводнів чутливими, високоселективними методами газового аналізу є складна науково-технічна задача. Контроль рівня забруднення, в першу чергу, ускладнюється наявністю в атмосфері одночасного знаходження великої кількості вуглеводнів різних класів: насичених вуглеводнів (парафіни, ізопарафіни, нафтени), ненасичених вуглеводнів (олефіни, алкени, алкіни, ацетилен), ароматичних вуглеводнів (бензол, алкіл бензол). Таким чином, наявна актуальна проблема оптимального вибору відповідного методу газового аналізу і побудованого на його основі газоаналізатору для вимірювання концентрації вуглеводневих з'єднань [6]. Останнім часом широке застосування для автоматичного контролю вуглеводнів знайшов полум'яно-іонізаційний метод, як найбільш чутливий до органічних речовин, функція перетворення якого має лінійний характер [7, 8].

#### Постановка задачі

Принцип роботи полум'яно-іонізаційного детектора (ПД), описаного

вперше Мак-Уїльямом і Дьюаром (1958 р.), заснований на іонізації молекул органічних речовин в полум'ї водню [6]. Електропровідність чистого водневого полум'я надзвичайно низька (опір полум'ю досягає  $10^{-12} - 10^{-14}$  Ом). Молекули органічних речовин, що вводяться у водневе полум'я, іонізуються, внаслідок чого електропровідність полум'я різко зростає. Якщо таке полум'я помістити між електродами, до яких прикладена постійна напруга, то між ними з'явиться іонізаційний струм. Струм іонізації ( $10^{-7}$ - $10^{-12}$  А) посилюється електрометричним підсилювачем постійного струму і реєструється самописним приладом. Полум'яно-іонізаційні детектори є чутливими і можуть використовуватися для вимірювання надзвичайно низьких концентрацій органічних речовин ( $10^{-9}$  -  $10^{-12}$  г/с).

У функціонально-схемному відношенні більшість розроблених полум'яно-іонізаційних газоаналізаторів для виміру суми вуглеводнів будуються за класичною одно каналною функціональною схемою [6, 7, 8]. Аналіз схеми вказує на необхідність детального дослідження основних метрологічних характеристик полум'яно - іонізаційного детектора: функції перетворення, впливу витрат газових потоків на вихідний сигнал, чутливості, лінійного діапазону перетворення детектора, величині фонового струму, рівню флуктуаційних шумів. Особливо актуальним є визначення впливу витрат трьох газових потоків: «Проба», «Повітря», «Водень», які є необхідними для функціонування ПД, на вихідний сигнал ПД.

До основних метрологічних характеристик полум'яно іонізаційного детектору слід віднести: чутливість, значення граничної чутливості, лінійний діапазон перетворення детектора, величину фонового струму, рівень флуктуаційних шумів.

### Основні метрологічні характеристики ПД

ПД є поточковим і реагує на кількість речовини, що надходить в детектор в одиницю часу. Струм, що утворюється при іонізації, прямо пропорційний кількості органічної речовини, що надходить в водневе полум'я пальника [6]:

$$I_s = S \cdot G, [A], \quad (1)$$

де  $S$  – постійна детектора, що характеризує чутливість ПД, А/мг/с;  $G$  – потік речовини через детектор, г/с.

Чутливість визначається струмом  $I_s$ , що викликає в детекторі при проходженні через нього одиниці потоку речовини. Зв'язок між потоком органічної речовини і потоком насичення може бути визначена [6]:

$$I_s = e \left( \frac{dN}{dt} \right) = \frac{eEAn}{M} G, [A], \quad (2)$$

де  $e$  – заряд електрона ( $-1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл);  $(dN / dt)$  – число пар іонів на  $1 \text{ см}^3$  за 1 с;  $E$  – коефіцієнт ефективності іонізації органічних молекул в полум'ї водню ( $10^{-5}$  -  $10^{-6}$  г/с);  $A$  – число Авогадро ( $6,23 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$ );  $G$  – потік органічних речовин, г/с;  $M$  – молекулярна вага речовини, г;  $n$  – число атомів вуглецю в молекулі.

З формули (1) і (2) випливає, що чутливість ПД можна визначити [6]:

$$S = \frac{eEAn}{M}, \left[ \frac{A}{2/c} \right]. \quad (3)$$

Оскільки масова чутливість наближено вважається постійною, то ця величина зазвичай розраховується по одній контрольній речовині (метан), прийнятій за еквівалент.

ПД використовується для аналізу мікроконцентрацій вуглеводнів в атмосферному АЗС. Нижній діапазон виміру 0 - 0,1 ppm. При цьому основною метрологічною характеристикою є гранична чутливість. Поріг чутливості характеризується мінімальною кількістю речовин  $g_{\min}$ , на яке реагує прилад і зазвичай визначається [6]:

$$g_{\min} = \frac{2\delta}{S}, [мг / с], \quad (4)$$

де  $\delta$  – рівень флуктуаційних шумів;  $S$  – чутливість.

Практично досяжний поріг чутливості складає 0,01 ppm по метану. Представимо цю кількість у вагових одиницях:

$$g_{\min} = 1 \cdot 10^{-6} C_0 \cdot Q \cdot \rho, \quad (5)$$

де  $C_0$  – концентрація контрольної речовини, ppm;  $Q$  – об'ємна витрата контрольної речовини, мл/с;  $\rho$  – густина контрольної речовини, мг/мл.

Лінійний діапазон характеризується відношенням найбільшої концентрації до найменшої, між яким знаходиться область лінійних показань детектора. Чим ближче ця залежність до лінійної, тим точніше аналіз

$$R = \frac{g_{\max}}{g_{\min}}. \quad (6)$$

Для полум'яно іонізаційного детектора ЛДД - в межах  $10^7 - 10^8$ .

Фоновий струм ПД визначається, як іонний струм насичення, що протікає між електродами детектора при горінні чистого водню і відсутності аналізуемого газу. Експериментально встановлено, що фоновий іонний струм в області робочих режимів полум'яно-іонізаційного детектора росте пропорційно витраті водню і, що нахил цієї залежності визначається ступенем очищення водню. Зменшення величини фонового струму досягається використанням високочистих по вуглеводням газів, що формують полум'я. Зменшення фонового струму дозволяє поліпшити граничну чутливість детектора. Максимально допустима величина фонового струму –  $2 \cdot 10^{-11}$  А.

### Розрахунок вихідного сигналу ПД

Діапазони вимірювання газоаналізатора вимірювання випаровувань палива на АЗС повинні бути: 0-0,1 ppm, 0-1,0 ppm, 0-10 ppm.

Розрахунок вихідного сигналу за струмом проводимо за формулою (1), виходячи з оптимальної розрахункової чутливості  $S=1,4 \cdot 10^{-5}$  А/мг/с по метану. Характеристику перетворення сигналу вважаємо лінійною на всіх діапазонах вимірювання. Вихідний сигнал ПД пропорційний кількості атомів вуглецю в

молекулі вуглеводню. Проведений теоретичний розрахунок дозволяє сформулювати технічні вимоги до основних метрологічних характеристик ПД.

Таблиця. Залежності вихідних сигналів ПД від об'ємної концентрації метану в повітрі АЗС:

Концентрація $\text{CH}_4$ в повітрі, ppm	0,01	0,1	0,5	1,0	5,0	10,0	30,0	50,0
Вагова концентрація G, мг/с	$7,2 \cdot 10^{-9}$	$7,2 \cdot 10^{-8}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$	$7,2 \cdot 10^{-7}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$7,2 \cdot 10^{-6}$	$2,16 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$
Вихідний сигнал $\sim I_S$ , А	$1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-10}$

Технічні вимоги:

1. Чутливість не менше –  $1,4 \cdot 10^{-5}$  А/мг/с;
2. гранична чутливість (по метану) не більше – 0,01 ppm ( $7,2 \cdot 10^{-9}$  мг/с);
3. Рівень флуктуаційних шумів не більш –  $5 \cdot 10^{-14}$  А;
4. Початковий фоновий струм не більше –  $2 \cdot 10^{-11}$  А;
5. Вхідні і вихідні сигнали повинні відповідати для діапазонів:  
0-0,1 ppm –  $0 \cdot 10^{-11}$  А, 0-1,0 ppm –  $0 \cdot 10^{-10}$  А, 0-10 ppm –  $0 \cdot 10^{-10}$  А.

#### **Експериментальні дослідження метрологічних характеристик ПД**

В ході експериментальних досліджень було вивчено вплив зміни режимів роботи на величину вихідного сигналу ПД. Технічні характеристики газоаналізатора значною мірою залежать від номінальних значень витрат газів та їх стабілізація. Газовий режим повинен бути обраний таким, щоб забезпечити максимальну чутливість полум'яно-іонізаційного детектора, (що особливо важливо для підсилювача газоаналізатора) у поєднанні з низьким рівнем шуму і величиною фонового струму для досягнення мінімальної граничної чутливості, що забезпечує вимір в діапазоні 0 – 1 ppm. При проведенні експериментальних робіт в якості електрометричного підсилювача використовувався серійний електрометричний вольтметр ВК2-16, що має діапазон, вимірюваних постійних струмів від  $2 \cdot 10^{-16}$  до  $3 \cdot 10^{-7}$  А. Основна похибка при вимірюванні струму  $\pm 10\%$  дрейф нуля 240 мкВ за 24 години.

Для реєстрації показань використовувався самописний потенціометр КСП- 4. З метою вибору оптимального режиму роботи газоаналізатора були досліджені залежності величини струму сигналу від витрати водню, повітря для горіння і аналізованого повітря. Були проведені дослідження залежності величини фонового струму від витрати водню в ПД. Оптимальна витрата водню – 40 мл/хв. Рекомендована відповідність водню і повітря на горіння для вітчизняних серійних конструкцій ПД становить 1:10.

Відносно велика витрати повітря викликає нестабільність полум'я, що сприяє збільшенню шумів. Дослідження залежності фонового струму від витрати повітря для нової конструкції ПД показало, що оптимальне співвідношення витрат водню і повітря становить 1:5. Подальше збільшення витрати повітря незначно впливає на величину фонового струму і чутливості. Також досліджено залежності величини струму сигналу ПД від витрати аналізованого повітря при постійній витраті водню (для різних його значень). Аналізований газ - атмосферне повітря, що задається в балон компресором безпосередньо з атмосфери. максимальна чутливість отримана при співвідношенні водню і аналізованого газу 1:1,5. При такому співвідношенні можна виділити ділянку в області максимуму, де спостерігається мінімальна залежність струму сигналу при зміні витрати проби в межах 5% від оптимального значення. При цьому маються на увазі допустимі зміни витрати в часі, а не його короточасні коливання, які викликають нестабільність полум'я і збільшення флуктуаційних шумів. Для витрати водню 40 мл/хв оптимальна витрата аналізованого повітря становить 60 мл/хв. Зміна витрати водню на 1 мл/хв, викликає зміну струму сигналу на 3 %.

Проведені дослідження дозволили вибрати оптимальний режим роботи ПД, а також визначити рівень динамічних похибок, що виникають за рахунок нестабільності витрат газів і розрахувати допустимі межі їх коливань. Допустимі коливання витрат водню повинні бути не більше  $\pm 1\%$ , аналізованого повітря і повітря на горіння не більше  $\pm 2\%$ . На основі проведених експериментальних досліджень був обраний оптимальний режим газових каналів ПД:

1. Витрата водню — 40 мл/хв.
2. Витрата аналізованого газу — 60 мл/хв..
3. Витрати повітря для горіння — 200 мл/хв.
5. Температура термостату детектора складала —  $70^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ .

6. Величина поляризованої напруги =150 В. Такий режим забезпечує високу чутливість газоаналізатора в сумісності з низьким рівнем флуктуаційних шумів, початкового фонового струму і низьку границю чутливості.

## Висновки

1. Різке збільшення кількості автомобілів призводить до техногенного навантаження на довкілля відпрацьованими газами автотранспорту. Кожна АЗС є джерелом викиду забруднюючих речовин (ЗР) [3,9]. Бурхливе зростання кількості АЗС в країнах Західної Європи привів до необхідності розробки відповідних методик і приладів, які дозволяють визначити обсяги рівня випаровувань палива при експлуатації АЗС [4,10,11]. Проведені дослідження підтвердили, що найбільш ефективним газоаналізатором для вимірювання атмосфери АЗС є полум'яно-іонізаційний газоаналізатора, як найбільш чутливий і надійний, з лінійною характеристикою у широкому діапазоні.

2. За результатами експериментальних досліджень були визначені технічні характеристики полум'яно-іонізаційного газоаналізатора вуглеводнів в атмосферному повітрі АЗС. Отримані наступні характеристики диференціального

полум'яно-іонізаційного газоаналізатора:

Чутливість	— $2 \cdot 10^{-5}$ А/мг/с;
Поріг чутливості(по метану)	— $5 \cdot 10^{-9}$ мг/с;
Початковий фоновий струм	— $1 \cdot 10^{-12}$ А;
Рівень флуктуаційних шумів	— $5 \cdot 10^{-14}$ А.

3. Встановлено, що найбільш суттєвий дестабілізуючий вплив на вихідний сигнал ПД справляє залежність вихідного сигналу до 3% від зміни об'ємної витрати аналізованої проби повітря АЗС, зміни витрат і повітря для горіння приводять до зміни вихідного сигналу ПД до 1%. Рівень змін витрат при цьому не повинен перевищувати 1 – 2 мл/хв.

Важливими параметрами приладу є стабільність і відтворюваність результатів вимірювання, яка залежить від впливу різних неінформативних параметрів на зміну значення вихідного сигналу. Чутливість ПД може змінюватися внаслідок порушення режимів роботи, в результаті зміни температури, атмосферного тиску і вологості навколишнього середовища. Визначення спільного впливу всіх цих факторів на чутливість ПД на даний час не досліджено.

#### Література

1. Варганов А. З. Методы и приборы контроля окружающей среды и экологического мониторинга : учебн. для вузов / А. З. Варганов, А. Д. Рубан. – М.: Издательство «Горная книга», 2009. – 640 с.
2. Івасенко В. М. Сучасні засоби інструментального контролю (газоаналізатори і газоаналітичні системи) відпрацьованих газів автомобілів / В. М. Івасенко, В. П. Приміський, Д. Г. Корнієнко, А. В. Ватаву, А. В. Жужа // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. Нові рішення в сучасних технологіях. – 2012. – № 68. – С. 135 – 141.
3. Соколова Е. В. Оценка факторов воздействия выбросов АЗС на воздушную среду их рабочей зоны и прилегающей территории / Е. В. Соколова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер. Строительство и архитектура. – 2011. – № 25 (44). – С. 392 – 397.
4. Рота Р. Виділення тепла з резервуарів: моделювання та експерименти / Р. Рота, С. Фраттіні. – 2001. – №24. – С. 5847 – 5857.
5. Андерсон М. Новий метод розрахунку після звітів по викидах бак / М. Андерсон // Нафта і газ. – 1997. – Вип. 95. – № 46. – С.77 – 78.
6. Приміський В. П. Стан та перспективи розвитку полум'яно-іонізаційного розвитку для вимірювання концентрації вуглеводнів / В. П. Приміський, А. В. Жужа // Метрологія та прилади. – 2013. – № 2. – С. 45 – 52.
7. Рыжков В. Ф. Портативный пламенно-ионизационный газоанализатор / В. Ф. Рыжков // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2004. – № 1. – С. 27 – 29.
8. Пат. України № 49063 G01N 2762. Полум'яно-іонізаційний газоаналізатор для поста екологічного контролю автомобілів / В. П. Приміський, В. О. Румбешта // Бюл. винаходів – 2002. – № 9.
9. Соколова Е. В. Обоснование мероприятий по снижению уровня воздействия АЗС на атмосферу городских комплексов / Е. В. Соколова, С. А. Кошкарев // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2013. – № 3 (36). – С.102 – 107.
10. Франчук Г. М. Аналіз даних про токсичність паливно-мастильних матеріалів для людини / Г. М. Франчук, М. М. Николаяк // Вісник НАУ. – 2007. – № 3-4 (33). – С. 54 – 58.

11. Івасенко В. М. Розрахункова модель випаровувань автозаправних станцій / В. М. Івасенко // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – № 40 (1083). – С. 51 – 59.

Надійшла до редакції  
03 квітня 2015 року

© Івасенко В. М., 2015

УДК 681.586.57

## ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРЕДМЕТОВ

*Худякова Л. О., Сташкевич В. Ф., Кусик К. В.*

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
г. Киев, Украина  
E-mail: office@micra.com.ua*

*Оптические датчики приобрели широкое применение в системах промышленной автоматизации для решения задач связанных с обнаружением объектов. Достоинствами оптических датчиков является низкая стоимость и простота реализации. Недостатками оптических датчиков является сильная зависимость от уровня внешнего освещения и температурная нестабильность.*

*В данной статье предложен принцип реализации оптического датчика с использованием модулированного инфракрасного излучения. Это усложняет техническую реализацию оптического датчика, но позволяет устранить зависимость порога срабатывания от уровня внешнего освещения и уменьшить зависимость от температуры внешней среды и расширить сферу применения оптических датчиков*

**Ключевые слова:** *оптический датчик, инфракрасное излучение.*

### **Введение**

В настоящее время на рынке измерительных систем и датчиков доминирующее положение занимают электронные измерительные технологии, которые предполагают преобразование измеряемый параметр в электрический сигнал и последующую его обработку. Альтернативой подобному подходу является использование оптических систем измерения, где производится обработка оптического сигнала. Несмотря на стабильный рост рынка оптических датчиков относительная доля оптических датчиков в общем рынке измерительных систем остается небольшой.

Целью данной статьи является разработка оптического датчика для обнаружения предметов.

### **Практическая реализация**

Оптический датчик (ОД) для обнаружения предметов состоит из модулированного оптического излучателя и приемника. Датчик предназначен для безконтактной коммутации цепей постоянного тока при прерывании светового луча между передатчиком и приемником (световой барьер). При этом с помощью регулятора чувствительности устанавливается необходимый порог срабатывания приемника.