

С. І. КРИВОШАПОВ, А. М. СЕРГІЄНКО, О. І. НАЗАРОВ, О. В. КОЗЛОВ

МОНІТОРИНГ ВИТОКІВ ВУГЛЕВОДНЕВОГО ГАЗУ НА ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБАХ

Розглянуто основні джерела забруднення на автомобільному транспорті. Виконано аналіз впливу забруднення на людину. Проаналізовано нормативні акти щодо обмеження забруднення на транспорті. Зазначені типи шкідливих речовин, які контролюються на автомобілі та вказані недоліки діючого законодавства. Виконано аналіз датчиків серії MQ, які застосовуються для виміру концентрації таких забруднень повітря, як: бутану, ізобутану, пропану, пропан-бутану, метану, спирту, водень, диму, парів спирту, природного газу, чадного газу, вуглецевих газів, бензину, алкоголю. Запропоновано 3 схемі пристрою для виявлення присутності забруднення у повітрі: простий детектор зі світловою індексацією, газоаналізатор на базі мікроконтролера з текстовою та графічною індикацією на екрані. Наведено опис роботи устаткування та алгоритм програмного забезпечення мікроконтролера. Дані рекомендації з налаштування датчиків та пропозиції подальшого вдосконалення пристрою.

Ключові слова: автомобіль, викиди шкідливих речовин, токсичність, забруднення повітря, вуглеводень, газобалонне обладнання

S. KRIVOSHAPOV, A. SERGIENKO, A. NAZAROV, O. KOZLOV

MONITORING HYDROCARBON GAS LEAKS IN VEHICLES

The main sources of pollution in road transport are considered. The impact of pollution on humans is analyzed. Regulatory acts on limiting pollution in transport are analyzed. The types of harmful substances that are controlled in cars are indicated and the shortcomings of current legislation are indicated. The analysis of MQ series sensors is performed, which are used to measure the concentration of such air pollutants as: butane, isobutane, propane, propane-butane, methane, alcohol, hydrogen, smoke, alcohol vapors, natural gas, carbon monoxide, carbon gases, gasoline, alcohol. 3 device schemes for detecting the presence of pollution in the air are proposed: a simple detector with light indexing, a gas analyzer based on a microcontroller with text and graphic display on the screen. A description of the operation of the equipment and the microcontroller software algorithm are given. Recommendations for setting up sensors and proposals for further improving the device are given.

Key words: vehicle, waste fluids, toxicity, wind pollution, carbohydrates, gas cylinder possession

Вступ.

Значний внесок в загальну екологічну обстановку належить саме автомобільному транспорту, оскільки внесок промисловості в нашої країні незначний. Наприклад у Києві 89 % забруднення спричинене саме автомобілями. Біля 92 % населення всього миру вдихає повітря з забрудненнями, які шкідливі для організму. За висновками Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), забруднення повітря є причиною кожної з восьми смертей на планеті. В середньому на 100 тис. населення від забруднення повітря мікрочастками вмирає 120 людини. Так, за станом на 2012 рік від забруднення PM_{2,5} і PM₁₀ в Україні померло 54507 людини [1].

Кількість автомобілів постійно зростає і, як наслідок, буде зростати забруднення навколишнього середовища. Виправити ситуацію можна тільки за рахунок якісних заходів, спрямованих на зниження викидів кожного автомобіля. Знизити забруднення навколишнього середовища можна за рахунок переходу на альтернативні види палива. А саме: біопаливо, стиснений або скраплений газ, метиловий і етиловий спирти, водень, електрична енергія та інші. Проте, певна концентрація цих видів палива також шкідлива для людини.

Аналіз останніх досягнень і публікацій.

У роботі значну увагу буде приділено використанню на автомобілі зрідженого нафтового газу, як альтернативне джерело енергії. Переваги використання пропан-бутанової суміші відносно бензину наступні: газ виділяє набагато менше шкідливих продуктів горіння; найкраща захищеність від фальсифікації якості; менше схильний до детонації при будь-якому режимі роботи двигуна; має збільшую теплотворність на одиницю маси; більш дешевий.

Недоліками є: необхідність становлення додаткового обладнання, що підвищує споряджену масу автомобіля; підвищена леткість газу та здатність швидко накопичуватися підвищуючи вибухонебезпечність; скорочення потужності двигуна через низьку об'ємну теплоту згоряння; збільшення вартості та часу технічного обслуговування автомобіля.

Метан – один із найбезпечніших видів моторного палива. Пожежонебезпечні концентрації метану перебувають у межах 4,4–17 % обсягу, а парів дизельного палива – 1,1–8 % [2]. Газ майже вдвічі легший за повітря, тому при розгерметизації обладнання він відразу випаровується. По класифікації горючих речовин за рівнем чутливості метан входить у найбезпечніший 4-й клас.

Пропан та бутан - безбарвні горючі гази без запаху, які викликають асфіксію, подразнюють органи дихання, викликають наркоз. При вдиханні високих концентрацій людина дуже швидко втрачає свідомість, у неї розвивається колапс і настає смерть від зупинки дихання. Внаслідок подразнюючої дії газів можуть розвинути пневмонія та набряк легень. ГДК у робочій зоні бутану складає 300 мг/м³ [3].

Автомобіль не повинен забруднювати атмосферу вище за встановлену норму. В експлуатації контролюється допустимий рівень вмісту оксиду вуглецю та водню у відпрацьованих газах для автомобілів з бензиновим та газовим двигуном [4].

Об'ємна частка оксиду вуглецю не повинна перевищати для автомобілів що працюють: на бензині та на зрідженому нафтовому газі – 3,5 (2) %; на природному газу – 1,5 (1) % [5]. Об'ємна частка вуглеводню для двигунів з кількістю циліндрів не більш 4: на бензині та на зрідженому нафтовому газі – 1200 (600) млн⁻¹, природному газу – 600 (300) млн⁻¹; з кількістю циліндрів більш 4: на бензині та на зрідженому нафтовому газі – 2500 (1000) млн⁻¹, природному газу – 1800 (600) млн⁻¹ [5]. Без душків наведені данні роботи двигуна на режимі холостого ходу, а у душках – на підвищених обертах без навантаження.

Перехід з бензину на зріджений нафтовий газ вплине на витрату палива та концентрацію шкідливих речовин у відпрацьованих газах автомобіля. Ці зміни необхідно враховувати у методиці розрахунку та нормування витрати палива для автотранспортних засобів. Також відповідні зміни необхідно врахувати у нормативних актах, що обмежують викиди шкідливих речовин у газах, що відпрацьовали на транспорті.

Розробка пристрою, який буде реагувати на підвищену концентрацію шкідливих речовин у повітрі поблизу джерела забруднення, дозволить оперативно попереджати про виникнення небезпеки.

Мета та постановка задачі.

Мета роботи є підвищення рівня екологічної безпеки автомобіля за рахунок постійного контролю можливого джерела забруднення. Для виконання цієї мети запропоновано проводити моніторинг можливого джерела забруднення газобалонного обладнання безпосередньо на транспортному засобі завдяки приладу, якій оснащено датчиками для визначення присутності вуглецю в повітрі.

Визначення схеми пристрою для контролю рівня забруднення.

Зріджений нафтовий газ важче за повітря. Слід уважно ставитися до використання автомобіля, на якому встановлена газобалонна апаратура, у приміщеннях, складах та заправних станціях. В результаті можливого витоку газу з паливної системи він може накопичуватися в оглядових канавах, нішах, підвалах виробничих корпусів і гаражах, де зберігаються, обслуговується або ремонтується автомобілі. Також газ може накопичуватися в замкнутих порожнинах кузова автомобіля, в підкопотному просторі біля редуктору та біля ємності для зберігання палива.

Виявити надмірну концентрацію вуглеводню можна за допомогою датчиків серії MQ, які відносяться до напівпровідникових приладів. Принцип роботи датчиків заснований на зміні опору тонкоплівкового шару діоксиду олова SnO₂ при контакті з молекулами певного газу. Чутливий елемент датчика складається з керамічної трубки з покриттям Al₂O₃ та нанесеного на неї чутливий шар діоксиду олова. Чутливість до різних газів досягається варіюванням

складу домішок в чутливому шарі.

Випускаються наступні види датчиків:

- 1) MQ-2 - датчик газу реагує на бутан, пропан, метан, спирт, водень, сигаретний дим [6];
- 2) MQ-3 - датчик парів спирту [7];
- 3) MQ-4 - датчик природного газу реагує на природний газ і метан [8];
- 5) MQ-5 - датчик газу для вимірювання концентрації метану, ізобутан і пропан-бутан [9];
- 6) MQ-6 - датчик газу для детектування зріджених вуглеводневих газів, ізобутана, бутану [10, 11];
- 7) MQ-7 - датчик чадного газу CO [12];
- 8) MQ-8 - датчик водню та мало чутливий до LPG і алкогольним парам [13];
- 9) MQ-9 - датчик вуглецевих газів, в тому числі і чадного газу - CO, природного газу (метану) і скрапленого газу (пропану, бутану) [14];
- 10) MQ-135 - датчик якості повітря. Використовується для детектування газів: чадний газ CO, пари спирту, бензину, алкоголю та ін. [15].

У табл. 1 наведено порівняльну характеристику датчиків для вимірювання відстаней концентрації вуглеводнів в повітрі.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика датчиків серії MQ [6-15]

Параметр	Найменування датчиків								
	MQ-2	MQ-3	MQ-4	MQ-5	MQ-6	MQ-7	MQ-8	MQ-9	MQ-135
Напруга живлення, В	2,5-5	5	5±0,2	5	5±0,2	2,5-5	5±0,1	1.5-5	2,5-5
Струм, мА	150	150	≤180		≤180	350			180
Максимальна споживана енергія, мВт	800		≤900	800	≤900		≤900	≤350	900
Час відгуку, с	≤ 10		≤ 10		≤ 10			≥5	≤ 10
Час розігріву або відновлення, с		60				60		60	≤ 30
Діапазон чутливості, ppm	300-10 ⁴	0,05-10	300-10 ⁴		300-10 ⁴	10-10 ⁴	100-10 ⁴	10-10 ⁴	
Ціна, грн.	40	60	45	60	45	50	50	60	50

Датчики також можуть бути виконані у вигляді модуля (на платі) розміром 32 x 20 мм. Діапазон робочих температур – -10 ... +50 °С. Інформація передається в аналоговому та цифровому режимах.

Для роботи датчиків серії MQ потрібно живлення +5 В для нагріву активного шару чутливого елемента. Для передачі даних може використовуватися як 5 В так 3.3 В схема.

Залежно від концентрації шкідливої речовини датчик змінює опір у вимірювальному каналі, що призведе до зміни напруги щодо опорного значення. Характеристика концентрації опору є нелінійною.

Для роботи детектору присутності газу використана схема, яка зображена на рис. 1. Пристрій призначений для виявлення слідів скрапленого газу (пропан-бутану), але може бути використано для контролю концентрації других газів (в залежності від виду датчика).

Датчик розраховано на живлення струму з постійною напругою 5 В. Живлення на плату подається через стабілізатор, який перетворює напругу 14-9 В у напругу 5 В. На платі датчику GAZ1 встановлений резистивний регулятор, за допомогою якого можливо задати необхідний рівень спрацьовування, коли рівень сигналу на виводі D0 змінюється з 0 В на 5 В. Світло діод D1 включається через струмообмежуючий резистор R1 до цифрового виводу OUT. Паралельно до світової індикації запропоновано підключити зумер BUZ1, виконаний у вигляді п'єзовипромінювача з генератором.

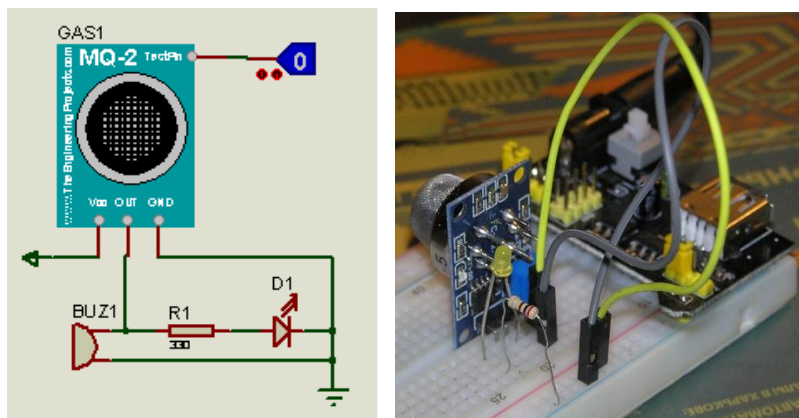


Рис. 1 – Схема детектору газу зі світлодіодною індикацією

Коли у повітрі, де розташований сенсор GAZ1, концентрація газу перевищує певної межі, то внутрішній опір зменшується, а напруги на виводах OUT зростає. При цьому включиться зумер BUZ1 і засвітиться світло діод D1. Резистор використовується для регулювання чутливості спрацьовування датчика.

Наступним етапом дослідження – це створення пристрою на базі мікроконтролеру. Мікроконтролер (англ. Micro Controller Unit, MCU) - мікросхема, призначена для управління електронними пристроями. На ринку поширені наступні види мікроконтролерів: PIC (Microchip), STM8 або STM32 (STMicroelectronics), AVR (Atmel), ARM (ARM Limited), ESP8266 або ESP32 (Espressif), MSP430 (TI) та інші. Для вирішення поставленого завдання, найбільш підходящим є мікроконтролер ATmega169P, ATmega328P або ATmega2561. Загальна схема застосування ATmega169P наведена на рис. 2.

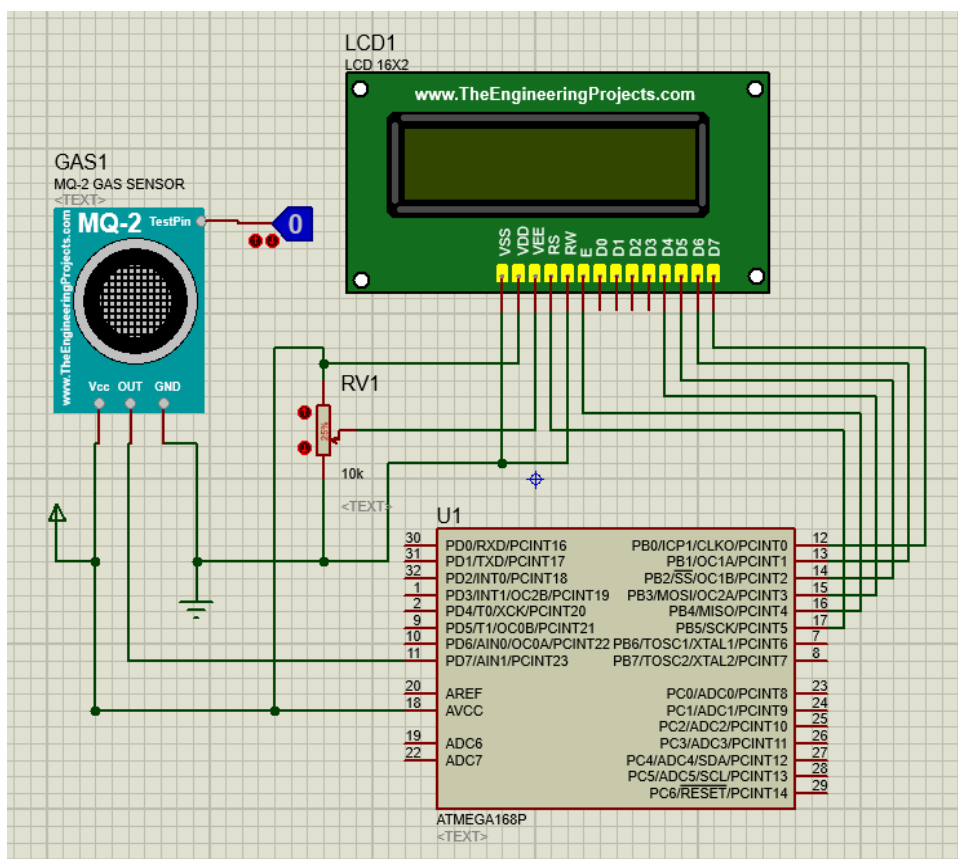


Рис. 2 – Схема детектору газу зі текстовою індикацією

На мікроконтролер U1 покладено такі функції: отримання аналогового сигналу з сенсору газу GAZ1; перетворення сигналу з аналогового в цифровий вигляд; розрахунок концентрації газу в повітрі за регресійної моделі; вивід результату виміру на текстовий дисплей LCD1.

Напруга з сенсору GAZ1 знімається з аналогового виводу A0 та подається на вхід порту PD7 мікроконтролеру ATmega169P, який налаштований на роботу аналогового-цифрового перетворювача (АЦП).

Вивід інформації на дисплей LCD1 відбувається по 4 каналам D4-D7, які підключені до цифрових портів PB0-PB3, що налаштовані на режим виводу. Через лінії PB4 і PB5 відбувається синхронізація та управління екраном.

Живлення мікроконтролеру U1, сенсору газу GAZ1 та LCD1 відбувається напругою 5 В через мікросхему стабілізації AMS1117. Підстроювальним резистором RV1 налаштовується інтенсивність освітлення символів на екрані дисплея LCD1.

З платами ARDUINO UNO може бути підключено графічний екран TFT LCD 2.4, який побудовано на базі мікросхеми SPFD5408, а з ARDUINO MEGA 2560 PRO – графічний дисплей 3.2" (3.5") 320x480 TFT LCD, на базі контролера HX8357B або ILI9486.

Загальна схема підключення наведена на рис. 3.

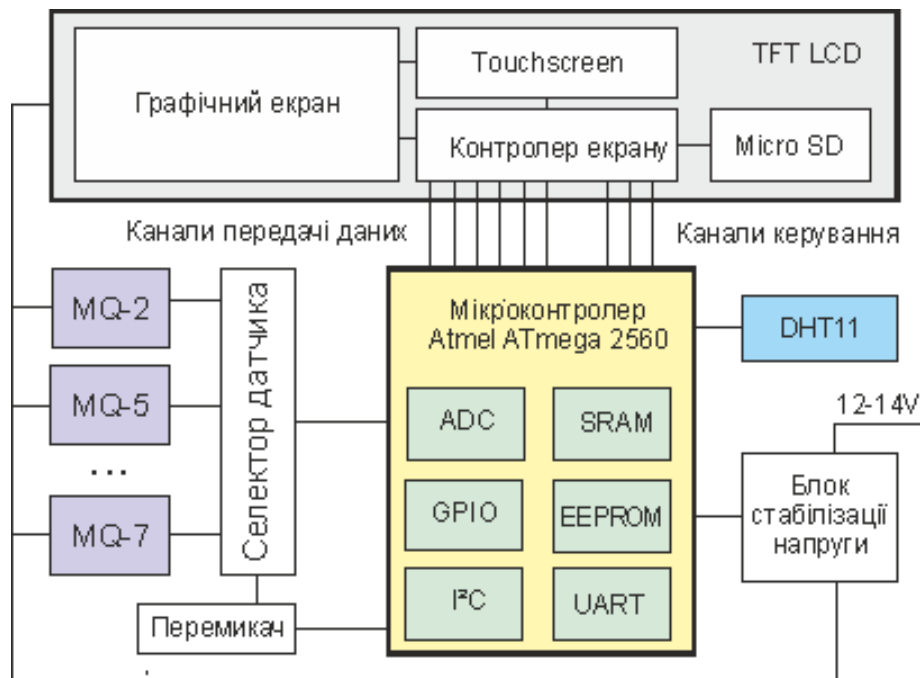


Рис. 3 – Схема застосування детектору газу з графічним дисплеєм

Дисплей TFT LCD 2.4 підключається до керуючого пристрою за допомогою 9 цифрових та 4 аналогових виводів. Модуль має сенсорний екран (touchscreen), який реагує на стілу. На платі обох модулів розміщено слот для картки пам'яті Micro SD. Дисплей 3.2" (3.5") 320x480 TFT LCD з'єднується з платою MEGA 2560 за 16 лініями каналу зв'язку.

К платам ARDUINO UNO або MEGA може одночасно підключити декілька сенсорів MQ, які налаштовані на виявлення різних видів газу.

Опір датчиків MQ залежить від вологості та температури навколишнього середовища. Ці параметрів можливо отримати за допомогою цифрових датчиків DHT11 або АНТ10. Останній має більшу точність і ціну. З мікроконтролером датчики температури і вологості з'єднуються по протоколу I²C, який апаратно підтримується ATmega.

Розробка алгоритму роботи програмного забезпечення

Мікроконтролер має гнучку логіку роботи, яка задається програмою, що завантажується у флеш пам'ять. Програма складена мовою програмування C (C++). Серед для програмування та завантаження є Arduino IDE.

Програма складається з двох блоків: ініціалізації параметрів, що виконується одноразово, та основного нескінченного циклу.

В блоку ініціалізації налаштовуються порти вводу-виводу, підключення об'єкту для роботи з екраном, налаштування каналу передачі даних по протоколу I²C.

Основна логіка детектору газу зосереджена в основному циклі.

Під час увімкнення пристрою живлення піддається як на мікроконтролер так і на датчик сенсору, активний шар якого має нагрітися до робочої температури. Час виходу датчика на режим після включення – до 5 хвилин. Програма мікроконтролера чекатиме цей час, вивівши відповідне повідомлення на дисплей.

Після прогріву програма перейде до циклу виміру напруги на аналоговому виході, куди підключений датчик MQ. Також програма отримає данні з датчику DHT11 про значення вологості та температури навколишнього середовища. На основі отриманої інформації спеціальна функція вважає значення концентрації шкідливої речовини та виведе це значення на екран.

Якщо буде проведено перемикання селектора датчика, про що контролер дізнається шляхом зміни рівня сигналу спеціально виділеної лінії, то основний вимірювальний цикл буде завершено. Програма налаштує параметри вибраного датчика, зачекає на час відновлення (до 60 с) і запустить новий цикл вимірювання.

Пропозиції щодо варіантів виконання та подальшого вдосконалення

Вимірювальний блок детектору газу може бути розташований у приміщенні виробничого корпусу або боксах для стоянки автомобіля. Всі блоки на підприємстві можливо зв'язати в єдину інформаційну сітку та підключити до загального серверу.

Для організації провідної сітки на кручений парі додатково на детекторі газу повинно підключити модуль Ethernet, наприклад LAN8720, якій взаємодіє з мікроконтролером по RMII interface.

Бездротова передача даних може бути реалізована через мережу WI-FI. Мікроконтролери NodeMCU на базі ESP8266 або ESP-WROOM-32 має вбудовану підтримку вбудовану підтримку стандартів WI-FI: 802.11 b/g/n.

Блок детектору газу може бути розташований безпосередньо на транспортному засобі у містах можливої витоків шкідливих речовин: поблизу бензобака, в підкапотному просторі двигуна, поблизу газового редуктора, біля системи випуску відпрацьованих газів.

Для поєднання всіх модулів з маршрутним комп'ютером автомобіля можна використовувати інформаційну мережу CAN. Для роботи з CAN-BUS інтерфейсом на модулі додатково необхідно встановити чіпів MCP2515 (CAN-контролер) та MCP2551 (CAN-трансівер). З мікроконтролером перетворювачі інтерфейсу з'єднується за протоколом UART, SPI або I²C.

Висновки.

Автомобіль є джерелом забруднення навколишнього середовища такими шкідливими речовинами як: оксид вуглецю, рідкі та газоподібні вуглеводні, оксиди азоту, сірчистий газ, сірководень, сажа, альдегіди та бенз(α)пірен. Оцінити шкідливий вплив на людину тієї чи іншої речовини можна через значення граничної допустимої концентрації (ГДК).

Для попередження забруднення доцільно використовувати детектори газу, які запропоновано встановлювати поблизу джерела забруднення у приміщенні виробничого корпусу та на транспортному засобі (біля паливного баку, газового редуктору, паливної магістралі, вихлопної системи).

Використання сенсорів серії MQ дозволяє створювати недорогі вимірювальні пристрої або сигналізатори для визначення концентрації шкідливих речовин в повітрі.

В залежності від типу сенсорів серії MQ можливо налаштувати пристрій на виявлення наступних забруднень: бутану, ізобутану, пропану, пропан-бутану, метану, спирту, водень, диму, парів спирту, природного газу, чадного газу, вуглецевих газів, бензину.

Список літератури:

1. Рівень смертності від забруднення повітря в Україні один з найвищих у світі - дослідження ВООЗ. [електронний ресурс]. URL: <https://ecoaction.org.ua/smertnist-vid-zabrudnennya-povitrya-v-ukraini-odna-z-vyschyh.html>. (Режим доступу 7.05.2025).
2. Експлуатаційні матеріали транспортних засобів : навчальний посібник / В. А. Сівак, В. А. Кириленко, Ю. О. Царьов та ін. – Хмельницький : Видавництво НАДПСУ, 2014. – 368 с.
3. ДСТУ EN 482:2016 Повітря робочої зони. Загальні вимоги до характеристик методик вимірювання вмісту хімічних речовин (EN 482:2012+A1:2015, IDT).
4. ДСТУ 3649:2010. Колісні транспортні засоби. Вимоги щодо безпечності технічного стану та методи контролювання. – К.: Держспоживстандарт України, 2011. – 30 с.
5. ДСТУ 4277:2004. Система стандартів у галузі охорони навколишнього природного середовища та раціонального використання ресурсів. Атмосфера. Норми і методи вимірювання вмісту оксиду вуглецю та вуглеводнів у відпрацьованих газах автомобілів з двигунами, що працюють на бензині або газовому паливі. – К.: Держспоживстандарт України, 2004. – 12 с.
6. Flammable Gas Sensor (Model: MQ-2) Manual. Version: 1.4. Valid from: 2015-03-10. [electronic resource]. URL: [https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Semiconductor%20Gas%20Sensor/MQ-2%20\(Ver1.4\)%20-%20Manual.pdf](https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Semiconductor%20Gas%20Sensor/MQ-2%20(Ver1.4)%20-%20Manual.pdf). (Accessed 7.05.2025).
7. Technical Data MQ-3 GAS Sensor. [electronic resource]. URL: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/MQ-3.pdf>. (Accessed 7.05.2025).
8. MQ-4 Semiconductor Sensor for Natural Gas. [electronic resource]. URL: <https://www.pololu.com/file/0J311/MQ4.pdf>. (Accessed 7.05.2025).
9. Grove - Gas Sensor (MQ5). User Manual. Version: 1.0. [electronic resource]. URL: https://www.mouser.com/datasheet/2/744/Seeed_101020056-1217478.pdf. (Accessed 7.05.2025).
10. MQ-6 Semiconductor Sensor for LPG. URL: https://www.pololu.com/file/download/MQ6.pdf?file_id=0J312.
11. Flammable Gas Sensor (Model: MQ-6). Manual. Version: 1.4. Valid from: 2015-03-10. [electronic resource]. URL: <https://www.winsen-sensor.com/d/files/semiconductor/mq-6.pdf>. (Accessed 7.05.2025).
12. MQ-7 Semiconductor Sensor for Carbon Monoxide. [electronic resource]. URL: <https://www.pololu.com/file/0J313/MQ7.pdf>. (Accessed 7.05.2025).
13. Flammable Gas Sensor. (Model: MQ-8). Manual. Version: 1.3. Valid from: 2014-05-01. [electronic resource]. URL: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-8%20Ver1.3%20-%20Manual.pdf>. (Accessed 7.05.2025).
14. MQ-9 Semiconductor Sensor for CO/Combustible Gas. [electronic resource]. URL: <https://www.digkey.be/htmldatasheets/production/2087922/0/0/1/MQ-9.pdf>. (Accessed 7.05.2025).
15. Air Quality Gas Sensor. (Model: MQ135). Manual. Version: 1.4. Valid from: 2015-03-10. [electronic resource]. URL: [https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Semiconductor%20Gas%20Sensor/MQ135%20\(Ver1.4\)%20-%20Manual.pdf](https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Semiconductor%20Gas%20Sensor/MQ135%20(Ver1.4)%20-%20Manual.pdf). (Accessed 7.05.2025).

References (transliterated):

1. Riven smertnosti vid zabrudnennia povitria v Ukraini ody z naivyschchykh u sviti - doslidzhennia VOOZ. [elektronnyi resurs]. URL: <https://ecoaction.org.ua/smertnist-vid-zabrudnennya-povitrya-v-ukraini-odna-z-vyschyh.html>. (Rezhym dostupu 7.05.2025).
2. Ekspluatatsiini materialy transportnykh zasobiv : navchalnyi posibnyk / V. A. Sivak, V. A. Kyrylenko, Yu. O. Tsarov ta in. – Khmelnytskyi : Vydavnytstvo NADPSU, 2014. – 368 s
3. DSTU EN 482:2016 Povitria robochoi zony. Zahalni vymohy do kharakterystyk metodyk vymiriuvannia vmistu khimichnykh rechovyn (EN 482:2012+A1:2015, IDT)
4. DSTU 3649:2010. Kolisni transportni zasoby. Vymohy shchodo bezpechnosti tekhnichnoho stanu ta metody kontroliuvannia. – K.: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2011. – 30 s.
5. DSTU 4277:2004. Systema standartiv u haluzi okhorony navkolyshnoho pryrodnoho seredovishcha ta ratsionalnoho vykorystannia resursiv. Atmosfera. Normy i metody vymiriuvannia vmistu oksydu vuhletsia ta vuhlevodniv u vidpratsovanykh hazakh avtomobiliv z dvyhunamy, shcho pratsiuiut na benzyni abo hazovomu palyvi. – K.: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2004. – 12 s.
6. Flammable Gas Sensor (Model: MQ-2) Manual. Version: 1.4. Valid from: 2015-03-10. [electronic resource]. URL: [https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Semiconductor%20Gas%20Sensor/MQ-2%20\(Ver1.4\)%20-%20Manual.pdf](https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Semiconductor%20Gas%20Sensor/MQ-2%20(Ver1.4)%20-%20Manual.pdf). (Accessed 7.05.2025).
7. Technical Data MQ-3 GAS Sensor. [electronic resource]. URL: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/MQ-3.pdf>. (Accessed 7.05.2025).
8. MQ-4 Semiconductor Sensor for Natural Gas. URL: <https://www.pololu.com/file/0J311/MQ4.pdf>. (Accessed 7.05.2025).
9. Grove - Gas Sensor (MQ5). User Manual. Version: 1.0. [electronic resource]. URL: https://www.mouser.com/datasheet/2/744/Seeed_101020056-1217478.pdf. (Accessed 7.05.2025).

10. MQ-6 Semiconductor Sensor for LPG. [electronic resource]. URL: https://www.pololu.com/file/download/MQ6.pdf?file_id=0J312. (Accessed 7.05.2025).
11. Flammable Gas Sensor (Model: MQ-6). Manual. Version: 1.4. Valid from: 2015-03-10. [electronic resource]. URL: <https://www.winsen-sensor.com/d/files/semiconductor/mq-6.pdf>. (Accessed 7.05.2025).
12. MQ-7 Semiconductor Sensor for Carbon Monoxide. [electronic resource]. URL: <https://www.pololu.com/file/0J313/MQ7.pdf>. (Accessed 7.05.2025).
13. Flammable Gas Sensor. (Model: MQ-8). Manual. Version: 1.3. Valid from: 2014-05-01. [electronic resource]. URL: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-8%20Ver1.3%20-%20Manual.pdf>. (Accessed 7.05.2025).
14. MQ-9 Semiconductor Sensor for CO/Combustible Gas. [electronic resource]. URL: <https://www.digikey.be/htmldatasheets/production/2087922/0/0/1/MQ-9.pdf>. (Accessed 7.05.2025).
15. Air Quality Gas Sensor. (Model: MQ135). Manual. Version: 1.4. Valid from: 2015-03-10. [electronic resource]. URL: [https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Semiconductor%20Gas%20Sensor/MQ135%20\(Ver1.4\)%20-%20Manual.pdf](https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Semiconductor%20Gas%20Sensor/MQ135%20(Ver1.4)%20-%20Manual.pdf). (Accessed 7.05.2025).

Надійшла (received) 10.05.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Кривошапов Сергій Іванович (Sergey Krivoshepov) – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри технічної експлуатації та сервісу автомобілів ім. проф. Говорущенко М.Я., м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4605-6790>; e-mail: keat@khadi.kharkov.ua

Сергієнко Антон Миколайович (Anton Sergienko) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», докторант кафедри електричного транспорту та тепловозобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6067-1672>; e-mail: sergienko2707@gmail.com

Назаров Олександр Іванович (Aleksandr Nazarov) – кандидат технічних наук, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри технічної експлуатації та сервісу автомобілів ім. проф. Говорущенко М.Я., м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9214-7506>; e-mail: hefer64@gmail.com

Козлов Олександр Володимирович (Oleksandr Kozlov) – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, аспірант кафедри технічної експлуатації та сервісу автомобілів ім. проф. Говорущенко М.Я., м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3607-9410>; e-mail: alexandrelicars@gmail.com