



УДК 543.42:621.384.3

АВТОМАТИЗОВАНИЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ ПРИСТРІЙ МОНІТОРИНГУ ВИТОКУ ГАЗУ НА СУДНАХ-ГАЗОВОЗАХ

AUTOMATED FIBER OPTIC DEVICE FOR GAS LEAK MONITORING ON GAS CARRIERS

¹Сандлер Альберт Кирилович, ²Карпілов Олександр Юрійович,

³Удолатій Вікторія Борисівна, ⁴Рябцов Олександр Васильович

¹Sandler Albert, ²Karpilov Oleksandr, ³Udoliaty Viktoria, ⁴Ryabtsov Oleksandr

^{1,2,3,4}НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-0709-0542>, ²<https://orcid.org/0009-0005-7823-5787>,

³<https://orcid.org/0009-0004-0069-5161>, ⁴<https://orcid.org/0000-0001-8259-7266>

E-mail: ¹sa@onma.edu.ua, ²kau.onma@gmail.com, ³uvb@te.net.ua, ⁴alex.ryabtsov@gmail.com

Copyright © 2025 by author and the journal "Automation of technological and business – processes".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI: [10.15673/atbp.v17i3.3163](https://doi.org/10.15673/atbp.v17i3.3163)

Анотація. Одним з напрямків, що визначають підвищення якості та вірогідності автоматизованих систем екологічного моніторингу стану повітряного середовища, є інтелектуалізація процесів обробки вимірювальної інформації на основі технології експертних систем. Системи такого типу дозволяють забезпечити підвищення якості розпізнавання технічного стану контрольованого середовища. Найбільш ефективною системою моніторингу стану повітряного середовища є система з методами організації вимірювань, що базуються на індивідуальному спостереженні зміни складу повітряної суміші в процесі експлуатації шляхом вимірювань, проведених на постійній основі тривалих періодів часу. Але, певним чином, розвиток згаданих систем стримується недосконалістю відповідних датчиків газоаналізу. Ціль роботи полягає у впровадженні новітніх засобів газоаналізу метану для запобігання негативного впливу небезпечних речовин на стан безпеки вантажних операцій. Об'єктом дослідження є процеси формування й перетворення вимірювального сигналу у засобі контролю витоку метану. Предметом дослідження є волоконно-оптичні засоби вимірювання вмісту метану. Пропонується вирішення поставленої задачі за рахунок впровадження нового волоконно-оптичного датчику. Відмінність датчика полягає у модифікованій схемі чутливого елемента, який являє собою скляну мембрану та сполучення трубчатого чутливого елемента та основного світловода.

Створення волоконно-оптичного датчику запропонованої конструкції дозволить отримати засіб вимірювання, який є інваріантним до неконтрольованих впливів дестабілізуючих факторів та має достатню чутливість до контрольованих параметрів. Застосування такого засобу сприятиме організації постійного та довготривалого моніторингу наявності витоку метану.

Abstract. One of the directions that determine the improvement of the quality and reliability of automated systems for environmental monitoring of the state of the air environment is the intellectualization of the processes of processing measurement information based on expert systems technology. Systems of this type allow to ensure the improvement of the quality of recognition of the technical condition of the controlled environment. The most effective system for monitoring the state of the air environment is a system with methods of organizing measurements based on individual observation of changes in the composition of the air mixture during operation by measurements carried out on a permanent basis over long periods of time. However, to some extent, the development of the aforementioned systems is constrained by the imperfection of the corresponding gas analysis sensors. The aim of the work is to introduce the latest means of methane gas analysis to prevent the negative impact of hazardous substances on the safety of cargo operations. The object of the study is the processes of formation and transformation of the measuring signal in a methane leak control device. The subject of the study is fiber-optic means of measuring methane content. The proposed solution to the problem is to introduce a new fiber-optic sensor. The difference of the sensor lies in the modified scheme of the sensing element, which is a glass membrane and the connection of the tubular sensing element and the main light guide. The creation of a fiber-optic sensor of the proposed design will allow obtaining a measuring instrument that is invariant to uncontrolled influences of destabilizing factors and has sufficient sensitivity to controlled parameters. The use of such a tool will



contribute to the organization of constant and long-term monitoring of the presence of methane leakage.

Keywords: measurement, methane, gas carrier, fiber optics, optical fiber

Ключові слова: вимірювання, метан, газозов, волоконна оптика, світловод

Технологічні та кліматичні умови завантаження та транспортування на суднах-газовозах можуть суттєво впливати на стан газових сумішей. Вплив морського навколишнього середовища та коливання параметрів режимів транспортування можуть сприяти додатковому витоку газу з транспортних танків або трубопроводної системи. Несвочасне виявлення та усунення причин витоку газу може спричинити катастрофічні наслідки (рис. 1).



Рис. 1. Судно-газовоз, як джерело потенційної небезпеки

Fig. 1. Gas tanker as a source of potential danger

З метою забезпечення безпеки судноплавства та вантажних операцій, рішення щодо здійснення всього логістичного комплексу заходів щодо суден-газовозів, ґрунтуються виключно на підставі постійного моніторингу технічного стану вантажних систем.

Тенденції розвитку сучасних технологій газових вантажних операцій свідчать, що саме застосування надійних, інваріантних до впливу зовнішніх збурень вимірювальних засобів, які легко імплементуються у суднові інформаційно-вимірювальні системи, забезпечують високу експлуатаційну ефективність та надійність функціонування суднового газовантажного комплексу.

Сучасна концепція "превентивного моніторингу" ґрунтується на різних методах визначення стану об'єкту контролю, зокрема – які засновані на принципах лазерної оптико-акустичної (ОА) спектроскопії і які дозволяють вимірювати концентрацію досліджуваного газу в складі аналізованої газової проби практично в режимі реального часу (на відміну від газової хроматографії). Практичне використання цієї концепції вимагає впровадження новітніх, більш ефективних, автоматизованих засобів моніторингу і значно ускладнює процедури контролю потенційних витоків газу.

Абсорбційна спектроскопія, або спектроскопія поглинання - спектроскопічний метод, при використанні якого вимірюють поглинання випромінювання при проходженні через зразок залежно від частоти або довжини хвилі. Зразок частково поглинає енергію, тобто фотони джерела випромінювання. Інтенсивність поглинання змінюється залежно від частоти, і така зміну представляють у вигляді спектра поглинання.

Метод абсорбційної спектроскопії дозволяє проводити вимірювання за повним електромагнітним спектром. Має рядом особливих властивостей: можливість одночасного одержання якісних і кількісних даних, більша інформативність щодо хімічної природи речовини, висока швидкість аналізу, висока чутливість методу, можливість аналізу речовин у всіх агрегатних станах, можливість аналізу сумішей без їхнього поділу на компоненти, можливість багаторазового використання проби для повторного дослідження, дозволяє досліджувати мікроскопічні об'єкти, можливість застосування комп'ютерів для обробки даних.

Для детектування метану традиційно використовуються гелій-неонові лазери, довжина хвилі випромінювання яких 3,3922 мкм збігається із центром однієї з досить сильних ліній поглинання метану.

Однак випромінювання лазера тільки на одній довжині хвилі недостатньо для одержання достовірних результатів особливо в суднових умовах, тому що ослаблення випромінювання лазера може бути викликано не



тільки поглинанням метану, а також багатьма іншими факторами, насамперед зміною коефіцієнта відбиття світла від різних об'єктів протягом вимірювання.

Більш ефективний диференціальний метод, у якому використовується два гелій-неонові лазери, що випромінюють на довжинах хвиль, 3,3922 мкм і 3,3912 мкм, причому поглинання метану на другій довжині хвилі в 20 раз менше, чим на першій. Оптична схема виводу випромінювання в цих приладах зроблена таким чином, що обидва лазери висвітлюють контрольований об'єкт по черзі з мінімальною затримкою за часом.

При обробці прийнятого сигналу розраховується різниця амплітуд сигналу в проміжки часу, відповідні до випромінювання різних лазерів. Ця різниця пропорційна середній концентрації метану на довжині оптичного шляху. Різниця коефіцієнтів поглинання для двох довжин хвиль, викликана фоновим концентрацією метану в повітрі на довжині оптичного шляху 100 м, становить 15%.

Така різниця сигналів досить легко детектується, і чутливість, і точність вимірів, видалося б, повинні бути достатньо високі. Однак чутливість і точність вимірів обмежуються іншими факторами. Насамперед, випромінювання лазерів у бік контрольованого об'єкту рознесені за часом, а коефіцієнт відбиття світла сторонніми об'єктами варіюється в межах 15%.

Тому для одержання достатньої чутливості й точності вимірів необхідно зменшувати проміжок часу між випромінюваннями різних лазерів до 1 мс і нижче, що ускладнює оптичну систему виводу випромінювання.

Інший спосіб – розфокусування вихідного лазерного пучка для усереднення коефіцієнта відбиття по більшій площі, але при цьому знижується точність визначення місця витoku.

Головний фактор обмеження точності вимірювань – несинхронні варіації потужностей випромінювання лазерів (дрейф і шум). Найбільш істотним недоліком таких приладів є вкрай низький динамічний діапазон детектируємих концентрацій. Перевищення середньої концентрації метану над фоновим всього в 10 раз приводить до зменшення прийнятого сигналу на довжині хвилі до нуля, і диференціальний метод перестає працювати.

Для того щоб обійти цю проблему пропонується вимірювати поглинання тільки на довжині хвилі 3,3912 мкм у випадку занулення сигналу на довжині хвилі 3,3922 мкм. Однак у цьому випадку виходить недиференціальний метод вимірів із зазначеними вище недоліками [1 - 3].

На підґрунті проведеного аналізу зроблено наступний висновок. Подальше удосконалення процесів волоконно-оптичного засобу моніторингу витoku газу можливе на основі впровадження рішень, які добре зарекомендували себе в атомній енергетиці, а саме переходу до застосування високоточної вимірювальної техніки, створеної на основі волоконно-оптичних технологій [4, 5].

Відомий оптичний датчик метану, що складається з джерела та приймача лазерного випромінювання (на рис. не показані), основи, віддзеркалюючого шару, основного світловоду, газопроникненої мембрани, заглушки та набору вторинних світловодів, які розташовані коаксіально до основного світловоду (рис. 2) [6].

Використання набору вторинних світловодів, які розташовані коаксіально до основного світловоду обумовлює такі особливості пристрою, які обмежують його можливості:

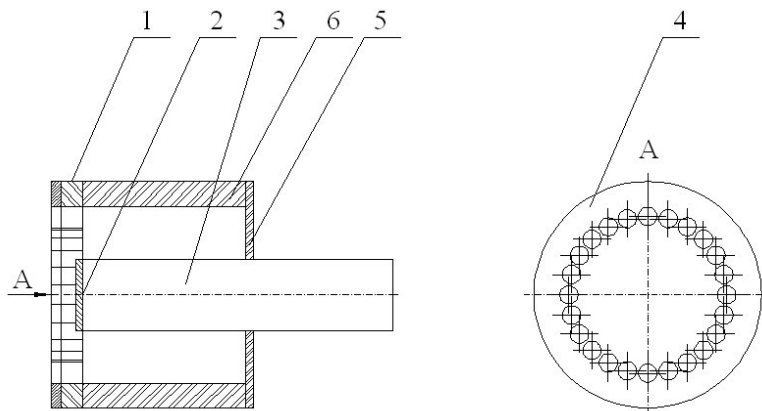
низька точність локалізації місця витoku газу;

технологічна складність виконання набору вторинних світловодів на основі зі збереженням необхідної геометрії для забезпечення оптичного зв'язку з основним світловодом;

низький рівень чутливості та швидкодія пристрою;

низька захищеність елементів пристрою від впливу експлуатаційних факторів.

У меншій мірі експлуатаційні та конструктивні фактори впливають на характеристики волоконно-оптичного датчику метану, в якому шар метану з поглинаючим компонентом відіграє роль селективного детектора, що має спектральну характеристику яка збігається зі спектром поглинання даного компонента.



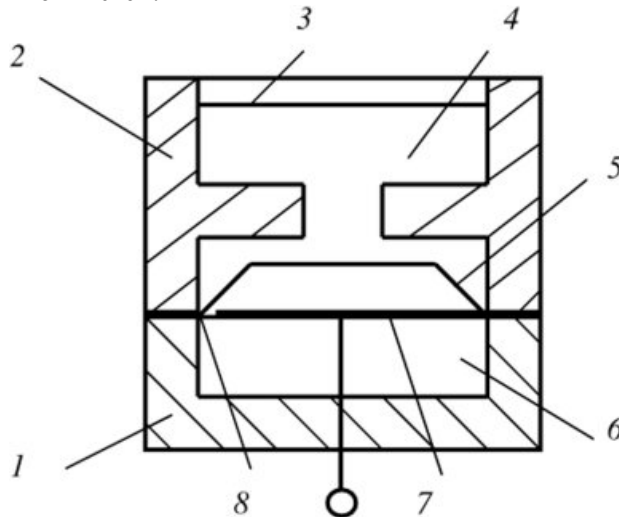
1 – основа; 2 – віддзеркалюючий шар; 3 – основний світловод;
4 – газопроникнена мембрана; 5 – заглушка; 6 – циліндрична оптична частина



Рис. 2. Схема волоконно-оптичного датчика метану
Fig. 2. Schematic of a fiber-optic methane sensor

При цьому поглинаючий шар метану використовується як аналізована суміш, детектор випромінювання й загороджувальний селективний оптичний фільтр. Спектральна характеристика датчика представляє набір декількох десятків окремих ліній, що утворюють смугу поглинання, характерну для коливально-обертальних спектрів в інфрачервоній (ІЧ) області. Датчик являє собою герметичну камеру, заповнену сумішшю поглинаючого компонента з інертним газом, і фактично є мікрофоном (рис. 3) [7].

Наведена схема одноканального й однопроменевого датчика проста, але на її основі важко реалізувати аналізатор з високими метрологічними характеристиками. Окрім того, суттєвим недоліком є наявність електричних ліній у складі датчика. Тому сучасні оптико-акустичні газоаналізатори реалізують на базі більш складних і структурно-надлишкових схем.



1 - нижня частина корпусу; 2 - верхня частина корпусу; 3 - вікно з матеріалу, прозорого у інфрачервоному діапазоні; 4 - камера поглинання інфрачервоного світла (активний) об'єм; 5 - рухлива мембрана конденсаторного або п'єзоелектричного мікрофона; 6 - нижній (пасивний) об'єм; 7 - ізолююча плита; 8 - поєднувальний тонкий канал верхнього та нижнього об'ємів, що служить фільтром низьких частот

Рис. 3. Схема оптико-акустичного датчика метану
Fig. 3. Scheme of an opto-acoustic methane sensor

В умовах, що склалися, доцільною стала розробка нового схемотехнічного рішення волоконно-оптичного датчика метану.

З оглядом на існуючий запит практики найбільш доцільним визначено застосування двоканального газоаналізатора, у якому аналізована суміш подається у вимірювальний та контрольний канали. В аналізаторах такого типу у контрольному каналі Крім того, у порівняльному каналі застосовується додаткова ємність, заповнена тим же газом, що й промінеприймач. За рахунок цього спектральна характеристика контрольного каналу суттєво змінюється, у ній вирізається центральна частина смуги поглинання.

Для розв'язування поставленої задачі запропонована схема волоконно-оптичного датчика метану.

Основна відмінність пропонованого датчика полягає у модифікованій схемі чутливого елемента (рис. 4).

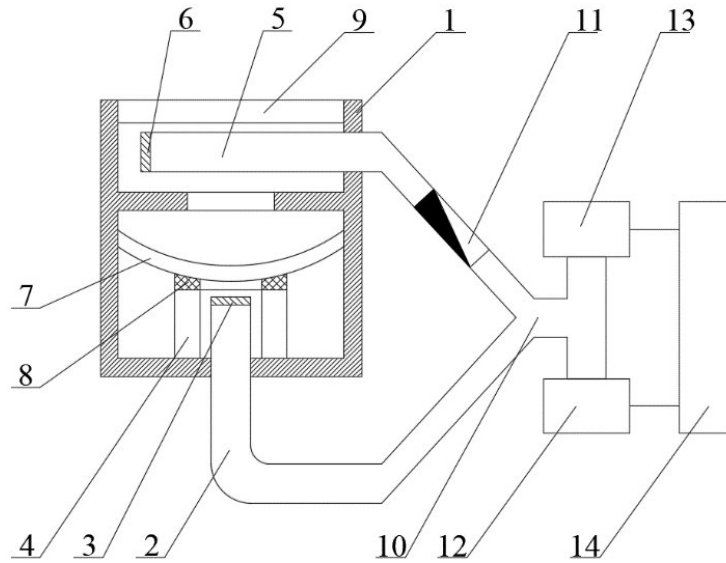
Останній являє собою газопроникнений корпус 1, виконаний зі штучного сапфірового скла. У основі жорстко закріплений основний світловод 2 з віддзеркалюючим шаром 3 на торці. Коаксіально до основного світловоду розташований суцільний чутливий світловод 4, який сполучений з рухливою мембраною 7 через проставку 8. У верхній частині корпусу знаходиться жорстко закріплений вторинний світловод 5 з віддзеркалюючим шаром 6 на торці. У верхній частині корпусу знаходиться вікно 9 з матеріалу, прозорого у інфрачервоному діапазоні. Випромінювання від джерела випромінювання 12 надходить до основного та вторинного світловодів через двобічний оптичний розгалужувач 10. У гілці розгалужувача, що сполучає його та вторинний світловод, міститься оптичний фільтр 11. У зворотному напрямку відбите від віддзеркалюючих шарів випромінювання через двобічний оптичний розгалужувач повертається до фотоприймача 13. Фотоприймач та джерело випромінювання сполучені з блоком живлення та обробки інформації 14.

Випромінювання від джерела випромінювання через двобічний оптичний розгалужувач надходить до основного та вторинного світловодів. У гілці, яка сполучає джерело з вторинним світловодом міститься оптичний фільтр. За допомогою оптичного фільтра до вторинного світловода надходить випромінювання з довжиною хвилі, яка співпадає зі смугою поглинання досліджуваного газу - 3,3922 мкм.

Верхня частина газопроникненого корпусу зі вторинним світловодом утворює контрольний канал



вимірювання. Шар газу з поглинаючим компонентом відіграє роль селективного детектора, що має спектральну характеристику, що збігається зі спектром поглинання даного компонента. При цьому поглинаючий шар газу можна використовувати як аналізовану суміш, детектор випромінювання й загороджувальний селективний оптичний фільтр. Випромінювання, яке було перетворене, відбивається від віддзеркалюючого шару та повертається крізь двобічний оптичний розгалужувач до фотоприймача [8, 9].



1 - газопроникнений корпус; 2 - основний світловод; 3 - віддзеркалюючий шар основного світловоду; 4 - трубчатий чутливий світловод; 5 - вторинний світловод; 6 - віддзеркалюючий шар вторинного світловоду; 7 - рухлива мембрана; 8 - ізолююча платина між мембраною та коаксіальним чутливим світловодом; 9 - вікно з матеріалу, прозорого у інфрачервоному діапазоні; 10 - двобічний оптичний розгалужувач; 11 - оптичний фільтр; 12 - джерело випромінювання; 13 - фотоприймач; 14 - блок живлення та обробки інформації

Рис. 4. Волоконно-оптичний датчик метана

Fig. 4. Fiber optic methane sensor

Для реалізації запропонованого способу використана наступна модель впливу присутності метану в атмосфері, що приводить до зміни оптичної потужності ІЧ-випромінювання у вимірювальному каналі (рис. 5) [10].

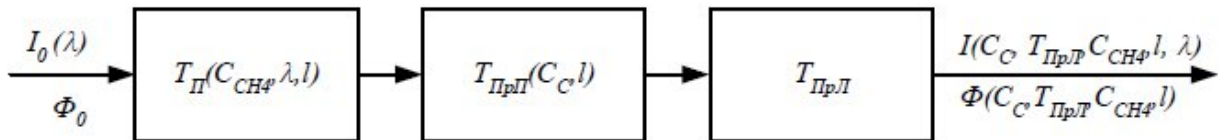


Рис. 5. Модель ланцюга перетворення в ІЧ - каналі вимірювача наявності метану в атмосфері

Fig. 5. Model of the conversion chain in the IR channel of the atmospheric methane meter

У моделі (див. рис. 5) вплив інформативного параметра на оптичну потужність ІЧ - випромінювання P_0 наведено у вигляді ланок, описуваних коефіцієнтом поглинання $T_{\Pi}(C_{CH_4}, l, \lambda)$ метану, коефіцієнтом пропускання $T_{\text{ПрП}}(C_c, l)$, газової суміші й коефіцієнтом пропускання $T_{\text{ПрЛ}}$ вікна з матеріалу, прозорого в інфрачервоному діапазоні. Дані коефіцієнти обумовлені поглинанням і розсіюванням у певному діапазоні довжин хвиль оптичного випромінювання.

У нижню частину корпусу, що є вимірювальним каналом, потік випромінювання потрапляє через вікно з матеріалу, прозорого у інфрачервоному діапазоні. Далі відбувається нагрівання обсягу поглиненою енергією та перехід коливань температури в коливання тиску газу (акустичні коливання). Акустичні коливання спричиняють вигин рухливої мембрани, яка через ізолюючу пластину передає тиск на трубчатий чутливий світловод.

Механічна напруга у трубчатому чутливому світловоді викликає зміну його показника заломлення. Величина додавання показника заломлення n^* у трубчатому чутливому світловоді під впливом рухливої мембрани може бути визначена як

$$n^* = n_2 + C_{12} P E_2 W^1,$$

де P - додане до трубчатого чутливого світловоду зусилля осьового стиску; E_2 - модуль пружності; W - жорсткість трубчатого чутливого світловоду при осьовому стискуванні



В наслідок стискування трубчатого чутливого світловоду відбувається порушення умов тунельного перекачування випромінювання між ним та основним світловодом. Величина коефіцієнту зв'язку за таких умов визначена як:

$$C = \frac{\pi D}{\sqrt{(\beta^2 - k^2(n_2 + n^*)^2)} d \rho^2} \frac{r \sqrt{(k^2 n_1^2 - \beta^2)} \exp\left\{-\frac{\beta}{\xi} \sqrt{(\beta^2 - k^2(n_2 + n^*)^2)} d\right\} \frac{\partial \rho}{\partial \theta}}{\left(k \rho \left(n_1^2 - (n_2 + n^*)^2\right)\right) K_1^2 \frac{\beta}{\xi} \sqrt{(\beta^2 - k^2(n_2 + n^*)^2)} d \frac{\partial \rho}{\partial \theta}},$$

де D - параметр висоти профілю комбінованого світловода; r - радіус комбінованого світловода; k - хвильове число; β - різниця постійних поширення у основному та трубчатому світловоді; $n^* = n_2 + C_{I2} P E_1 W^{-1}$ - збільшення показника заломлення у трубчатому світловоді при осьовому стискуванні; n_1, n_2 - показники заломлення у основному та трубчатому світловоді; K_1 - функція Бесселя.

Тоді, для потужності в стрижневій структурі буде визначатися як

$$P_R = \frac{\xi_1}{\xi} \frac{\sin^2 C(L - L^*) \sqrt{1 + \frac{\xi(\beta_1 - \beta_2)}{2C\xi^2}} \frac{\partial \rho}{\partial \theta}}{1 + \frac{\xi(\beta_1 - \beta_2)}{2C\xi^2}} \frac{\partial \rho}{\partial \theta} P_0,$$

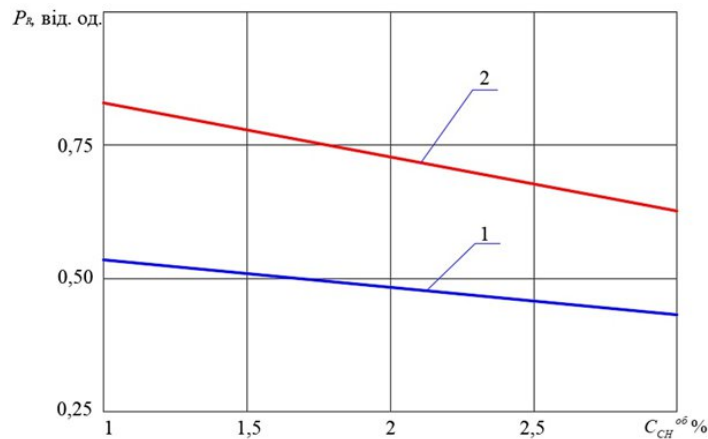
Порушення умов тунельного перекачування випромінювання знаходить своє відображення у зміні величини інтенсивності світлового випромінювання, яке відбивається від віддзеркалюючого шару. Перетворене випромінювання повертається крізь двобічний оптичний розгалужувач до фотоприймача. З фотоприймача отримані сигнали надходять до блоку живлення та обробки інформації.

Різниця сигналів від двох каналів досить легко детектується, і забезпечує високу чутливість і точність вимірів.

На рис. 6 наведені узагальнені залежності концентрації метану від відносної оптичної потужності, яка буде зареєстрована блоку блоці живлення та обробки інформації

У режимі калібровки, тобто у відсутності газового середовища відмінного від атмосферного повітря, випромінювання у датчику відбувається зменшення інтенсивності оптичного випромінювання, що проходить скрізь нього, яке обумовлене тільки впливом затухання у матеріалі волоконно-оптичних елементів. Інтенсивність випромінювання, що повертається до блоку живлення та обробки інформації та фіксується і запам'ятовується як перша поправка.

У динамічному режимі (режим вимірювання) випромінювання від джерела випромінювання через двобічний оптичний розгалужувач надходить до основного та вторинного світловодів. У гілці, яка сполучає джерело з вторинним світловодом міститься оптичний фільтр. За допомогою оптичного фільтра до вторинного світловода надходить випромінювання з довжиною хвилі, яка співпадає зі смугою поглинання досліджуваного газу - 3,3922 мкм.



1 - кварцовий світловод; 2 - світловод зі штучного сапфіру

Рис. 6. Узагальнені залежності концентрації метану від відносної оптичної потужності, яка буде зареєстрована блоку блоці живлення та обробки інформації

Fig. 6. Generalized dependences of methane concentration on the relative sampling power, which will be registered by the power supply and information processing unit

Верхня частина газопроникненого корпусу зі вторинним світловодом утворює контрольний канал вимірювання. Шар газу з поглинаючим компонентом відіграє роль селективного детектора, що має спектральну характеристику, що збігається зі спектром поглинання даного компонента. При цьому поглинаючий шар газу можна використовувати як аналізовану суміш, детектор випромінювання й загороджувальний селективний оптичний фільтр. Випромінювання, яке було перетворене, відбивається від віддзеркалюючого шару та



повертається крізь двобічний оптичний розгалужувач до фотоприймача.

У нижню частину корпусу потік випромінювання потрапляє через вікно з матеріалу, прозорого у інфрачервоному діапазоні.

Далі відбувається нагрівання об'єкту поглиненою енергією та перехід коливань температури в коливання тиску газу (акустичні коливання). Акустичні коливання спричиняють вигин рухливої мембрани, яка через ізолюючу пластину передає тиск на трубчатий чутливий світловод. Механічна напруга у трубчатому чутливому світловоді викликає зміну його показника заломлення. В наслідок відбувається порушення умов тунельного перекачування випромінювання між трубчатим чутливим світловодом та основним світловодом [11-16].

Реалізація волоконно-оптичного газоаналізатора за двоканальною схемою, окрім зазначеної властивості, забезпечить вимірювальному пристрою:

можливість точної локалізації місця та концентрації витоку метану;

різність спектральних характеристики контрольного та вимірювального потоків за рахунок застосування додаткових газових шарів, що відіграють роль оптичних фільтрів, які вирізують частину смуги поглинання. У результаті контрольний та вимірювальний потоки випромінювання займають різні спектральні канали;

підвищену захищеність елементів;

високий рівень чутливості та швидкодії.

Пристрій є простим у виготовленні та застосуванні, бо для його створення застосовуються освоєні промисловістю волоконно-оптичні компоненти та елементи.

Суттєве обмеження модливостей пристрою може бути сполучене зі впливом агресивного середовища на елементи датчика. Тобто у конструкції бажано передбачити компенсацію похибок у отриманні вірогідної інформації в умовах коли на відбувається деструкція під впливом дестабілізуючих експлуатаційних факторів.

З оглядом на можливості, обмеження та недоліки, розвиток дослідження має полягати у:

– подальшому вдосконаленні математичної моделі, яка дозволить враховувати більший діапазон факторів, що впливають на точність вимірювання;

– оптимізації параметрів всіх елементів датчика за критеріями надійності та швидкодії на основі новітніх матеріалів та отриманої математичної моделі [17-18].

Для більш детального дослідження доцільним є використання програми System Identification Toolbox для визначення параметрів моделі датчика за його перехідними характеристиками, отриманими в активному експерименті [19].

Підвищення рівня автоматизації суден неухильно вплине на зростання напруженості інтелектуальної діяльності екіпажу судна. Головна функція суднового персоналу пересунеться в площину аналізу стану технічних засобів, навколишнього середовища, ситуації і прийняття рішення, а керуючі дії будуть надалі спрощуватися [20].

Імплементация новітніх технологій вимірювання матиме ключове значення для підвищення економічної ефективності взаємодії між стейкхолдерами та сприятиме досягненню соціальних вигод на ринку підготовки відповідних фахівців. Ця ініціатива сприяє взаємодії між навчальними закладами та підприємствами, забезпечуючи сталість та фінансову стабільність, що є ключовими для успішного розвитку галузі транспортування газоподібних вуглеводнів морем [21].

References

1. Sandler, A. K., Danchuk, D. P. Zasiб pidvyshchennya efektyvnosti monitorynhu stanu vantazhu na sudnakh-hazovozakh na osnovi volokonno-optychnykh tekhnolohiy // Automation of Technological and Business Processes. – 2021. – Т. 13. – №. 4. – R. 18 - 26. DOI: 10.15673/atbp.v13i4.2202.
2. Shcherbakova, S. N., Vengerov, A. S. Analiz metodov detektirovaniya utecek metana. URL: https://www.researchgate.net/publication/356447041_ANALIZ_METODOV_DETEKTIROVANIA_UTECEK_METANA.
3. Udolatiy, V. B. Napryamy vdoskonalennya systemy ochyshchennya vidprats'ovanykh haziv na sudnakh // Science, research, development, technics and technology. – 2020. - № 29. – S. 66 - 69.
4. Sandler, A. K. Metod pidvyshchennya efektyvnosti diahnostuvannya tekhnichnoho stanu sudnovykh hazoturbinykh ustanovok na osnovi volokonno-optychnykh tekhnolohiy: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.20 / Kyivskyy universytet infrastruktury ta tekhnolohiy. – K., 2021. – 20 s.
5. Sandler, A. K. Informatsiyno-vymiryval'ni prystroyi na osnovi volokonno-optychnykh tekhnolohiy. – Odesa: Vydatinform NU "OMA", 2018. – 165 s.
6. Tsyupko, YU. M. Volokonno-optychnyy datchyk metanu // Naukovi pratsi Chornomors'koho derzhavnogo universy-tetu im. P. Mohyly kompleksu Kyievo-Mohylyans'ka akademiya. Seriya: Komp'yuterni tekhnolohiyi. - 2016. - T. 283. - Vyp. 271. - S. 87 - 91.
7. Sandler, A. K., Tsyupko, YU. M. Novoye skhemotekhnicheskoye resheniye volo-konnogo gazoanalizatora // Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv. – 2012. – Vyp. 18. – Odessa: ONMA. – S. 93 - 96.
8. Latyshenko, K. P. Tekhnicheskyye izmereniya i pribory. URL: library.atu.kz/files/155836/2.
9. Sandler, A. K. Chuvstvytel'nyy élement volokonno-optycheskoho akselerometra na osnove sapfyrovoho ste-kla // IKH mizhnarodna naukovu-metodychna konferentsiya "Sudnova elektroinzheneriya, elektronika i avtomatyka", 05 - 06 lystopada



- 2019 r.: materialy konferentsiyi. – Odesa: NU"OMA". – 2019. – S. 27 - 33. dx.doi.org/10.31653/2706-7874.
10. Vovna, O. V., Zory, A. A. Bystrodeystvuyushchyy yzmeritel' kontsentratsiy metana v rudnychnoy atmosferi uhol'nykh shakht // Visnyk Kremenchuts'koho natsional'noho universytetu im. M. Ostrohrads'koho. - 2013. - № 6. - S. 114 - 119.
11. Sandler, A., Budashko, V. Improving tools for diagnosing technical condition of ship electric power installations // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. - 2022. - №. 5 (119). - P. 25 - 33. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.266267.
12. Sandler, A. K., Opryshko, M. O. Volokonno-optycheskyy datchyk kontrolya sostoyannya tekhnicheskyykh zhydkostey y hazov // KH mizhnarodna naukovo-metodychna konferentsiya "Sudnova elektroinzheneriya, elektronika i avtomatyka", 24.11.2020 - 25.11.2020 r.: materialy konferentsiyi. – Odesa: NU "OMA". – 2020. – S. 63 - 68. DOI:10.31653/2706-7874.SEEEA-2020.11.1-245.
13. Sandler, A. K., Karpilov, A. YU. Primeneniye volokonno-opticheskikh datchikov v sistemakh avtomaticheskogo diagnostirovaniya sudovykh gazoturbinykh ustanovok // Avtomatizatsiya tekhnologichnikh i biznes-protseiv. – 2019. – T. 11. – № 2. – S. 46 - 52. DOI <https://doi.org/10.15673/atbp.v11i2.1374>.
14. Sandler, A. K., Karpilov, O. YU., Udolatiy, V. B. Volokonno-optychnyy prystriy dlya system avtomatyzovanoho ekolohichnoho monitorynha // Automation of Technological and Business Processes. - 2024. - № 16 (3). - P. 95 - 99. <https://doi.org/10.15673/atbp.v16i3.2880>.
15. Sandler, A. K., Tsyupko, YU. M., Sandler, A. A., Tsyupko, K. YU. Skhemo-tekhnicheskoye resheniye invariantnogo datchika vlazhnosti // Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv. – 2012. – Vyp. 18. – Odessa: ON-MA. – S. 97 - 102.
16. Sandler, A. K. Informatsiyno-vymiryval'ni prystroiy na osnovi volokonno-optychnykh tekhnolohiy: navchal'nyy posibnyk. – Odesa: Vydatinform NU "OMA", 2018. – 165 s.
17. Sandler, A. K., Omel'chenko, T. YU. Zastosuvannya novitnikh typiv optychnoho volokna u navihatsiynykh pid-vodnykh bezpilotnykh aparatakh // Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique: c avec des matériaux de la VIII conférence scientifique et pratique internationale, Paris, 4 avril 2025. Paris-Vinnytsia: La Fedeltà & UKRLOGOS Group LLC, 2025. - S. 214 - 221. DOI 10.36074/logos-04.04.2025.
18. Sandler, A. K., Budashko, V. V., Karpilov, O. YU. Volokonno-optychnyy zasib vyznachennya teploty z'horyan-nya hazu yakyy zastosovuyet'sya v sudnovykh enerhetychnykh ustanovkakh // Automation of Technological and Business Processes. - 2025. - № 17 (1). - P. 53 - 59. DOI <https://doi.org/10.15673/atbp.v17i1.3019>.
19. Levins'kyi, M. V., Levins'kyi, V. M. Parametrychna identyfikatsiya modeli ob'yekta keruvannya za re-zul'tatamy aktyvnoho eksperymentu // Automation of technological and business processes. – 2023. – T. 15. - № 2. – S. 35 - 40. DOI: 10.15673/atbp.v15i2.2523.
20. Kuz'menko, K. M., Sandler, A. K. Osoblyvosti formuvannya trudo-vykh rezerviv v umovakh avtomatyzatsiyi suden // Education and science of today: intersectoral issues and development of sciences: Collection of sci-entific papers "LÓHOS" with Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference, Cambridge, March 29, 2024. Cambridge-Vinnytsia: P.C. Publishing House & UKRLOGOS Group LLC. - 2024. - R. 79 - 82. DOI 10.36074/logos-29.03.2024.01.
21. Babachenko, M. V., Sandler, A. K. Pidvysychennya efektyvnosti vzayemo-diyi steykkholderiv ta mors'kykh zakladiv vyshchoyi osvity // Education and science of today: intersectoral issues and development of sciences: Collec-tion of scientific papers "LÓHOS" with Proceedings of the VI Internation-al Scientific and Practical Conference, Cambridge, March 29, 2024. Cam-bridge-Vinnytsia: P.C. Publishing House & UKRLOGOS Group LLC. - 2024. - R. 82 - 84. DOI 10.36074/logos-29.03.2024.019

Отримана в редакції 12.06.2025. Прийнята до друку 18.06.2025. Received 12 June 2025. Approved 18 June 2025. Available in Internet 30 June 2025