

УДК 614.72:547.381-074:543.544.45
DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-43-53

ARTICLE HISTORY
Received 14.05.2024
Accepted 24.05.2024

Журавльов Юрій Іванович¹, Сандлер Альберт Кирилович²,
Карпілов Олександр Юрійович³, Хнйунін Сергій Георгійович⁴
НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна^{1,2,3}
Міжнародний гуманітарний університет, Одеса, Україна⁴
ivanovich1zh@gmail.com¹, sa@onma.edu.ua²,
kau.onma@gmail.com³, reg-post@ukr.net⁴

Вдосконалення засобу контролю повітряного середовища у машинному приміщенні при роботі з вуглеводневими речовинами

Zhuravlyov Yuri¹, Sandler Albert², Karpilov Oleksandr³, Khniunin Sergii⁴
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine^{1,2,3}
International Humanitarian University, Odessa, Ukraine⁴
ivanovich1zh@gmail.com¹, sa@onma.edu.ua²,
kau.onma@gmail.com³, reg-post@ukr.net⁴

Improvement of air control means the engine room when working with hydrocarbon substances

Резюме. Обґрунтовано схематехнічне рішення засобу контролю рівня забруднення повітря суднових машинних приміщень шкідливою речовиною акролеїном. У запропонованому пристрої забезпечена більш адекватна локалізація появи акролеїна та перетворення параметрів газового середовища у зміни інформаційного сигналу, а також компенсація впливу дестабілізуючих факторів на вимірювальний канал датчику акролеїна. Визначені геометричні параметри складового елемента пристрою – фокону.

Summary. A well-founded circuit-technical solution of a means of controlling the level of air pollution in ship's engine rooms with the harmful substance acrolein. In the proposed device, a more adequate localization of the appearance of acrolein and transformation of parameters of the gas environment into changes in the information signal, as well as compensation

for the influence of destabilizing factors on the measuring channel of the acrolein sensor, are ensured. The geometric parameters of the constituent element of the device - the focon are determined.

Охорона навколишнього середовища, природних ресурсів і забезпечення безпеки, у тому числі й екологічної, завжди були одними із пріоритетних завдань будь-якого енергетичного та технологічного процесу. Одним із широко розповсюджених токсикантів навколишнього середовища є акролеїн, який утворюється в процесах згоряння палив і мастил на основі природних вуглеводнів. Акролеїн виділяється в процесі експлуатації двигунів внутрішнього згоряння, газотурбінних установок, парових і водогрійних котлів.

Акролеїн належить до 2 класу небезпеки, має загальнотоксичний, з вираженою дратівною, алергенною, мутагенною дією, пригнічує синтез дезоксирибонуклеїнової кислоти й клітинний розподіл, виявляє цитотоксичну дію. Гранично припустима концентрація акролеїна в атмосферному повітрі $0,03 \text{ мг/м}^3$, референтна концентрація при гострих інгаляційних впливах – $0,0001 \text{ мг/м}^3$, при хронічному інгаляційному впливі – $0,00002 \text{ мг/м}^3$. Високий тиск насиченої пари сприяє швидкому утвору небезпечних концентрацій акролеїна в повітрі машинних приміщень. Його пари викликають поразки дихальних шляхів, так навіть після видужання людини в його організмі залишаються незникаючі радіологічні й функціональні порушення. По характеру дії на організм людини акролеїн відносять до групи канцерогенних речовин.

Для розширення аналітичних можливостей встановлення реальної концентрації акролеїна в повітрі машинних приміщень при оцінці ризиків здоров'ю необхідно контролювати вміст акролеїна на рівні референтної концентрації.

Така задача з достатньою точністю розв'язується у лабораторних умовах методом газової хроматографії, чи методом, який поєднує газову хроматографію та мас-спектрометрію. Лабораторні дослідження такого роду забезпечують високу вірогідність та селективність вимірювань. Але прилади для аналізу надто коштовні, мають великі ваго-габаритні показники, вимагають великих витрат на технічне обслуговування та експлуатацію виключно висококваліфікованими фахівцями.

Існуючі портативні засоби контролю вмісту акролеїну в умовах впливу дестабілізаційних експлуатаційних чинників демонструють значне відставання якості вимірювань від лабораторних аналогів [1 – 3].

У зв'язку із цим актуальним завданням є розробка мобільного засобу помірної вартості, який забезпечить підвищення вірогідності процесів вимірювання концентрації акролеїна у широкому діапазоні за рахунок використання принципів часткової інваріантності до зовнішніх неконтрольованих впливів на вимірювання.

Для пошуку шляхів поліпшення метрологічних характеристик пристроїв контролю акролеїну були проаналізовані конструкції найпоширеніших вимірювальних перетворювачів.

Відомим є волоконно-оптичний датчик газового аналізу, що складається з основи, віддзеркалюючого шару, основного світловоду, чутливих світловодів, мультиплексора/демультиплексора та розгалужувача [4]. Конструкція приладу являє собою статичну конструкцію без спроможності модифікації, що суттєво обмежує спроможності поширення діапазону вимірювань. Пристрій не є інваріантним до температурного впливу, бо відсутня термокомпенсація коливань температури зовнішнього середовища та контрольованої газової суміші. Необхідність обробки основного та чутливих світловодів з надзвичайно високою якістю для уникнення створення умов для появи паразитної модуляції обумовлює неприйнятну для портативних пристроїв вартість. Теж саме стосується і необхідності наявності складної системи підтримки геометрії оптичного каналу тунельного зв'язку основного та чутливості світловодів.

Найбільш близьким за технічною сутністю та результатом, що досягається, до рішення задачі вдосконалення датчику акролеїну, є волоконно-оптичний датчик газового аналізу. Датчик складається з джерела випромінювання, світлофільтрів, конденсору, діафрагми, модулятора, вимірювальної та порівняльної камер, лінзи та фотоприймача [5].

Складність конструкції, необхідність операцій взаємного юстирування оптичних елементів та заходів щодо підтримки чистоти оптичних поверхонь суттєво збільшує вартість приладу та його обслуговування. Відсутність термокомпенсації коливань температури зовнішнього середовища та контрольованої газової суміші та вплив на результати вимірювання неідентичності вимірювальної та порівняльної камер негативно впливають на вірогідність вимірювань. А велика кількість оптичних сполучень створює умови для появи паразитної модуляції, що певним чином погіршує метрологічні характеристики приладу.

Мета дослідження – створення волоконно-оптичного датчику акролеїна, обґрунтованої вартості, спрощеної конструкції з ідентичних елементів, у якому мінімальна кількість оптичних з'єднань, відсутня

залежність від стану зовнішнього середовища та контрольованої газової суміші, та одночасно збережені високий рівень чутливості та швидкодія пристроїв відомих типів.

Науково-технічне завдання, яке створено запитом практики, вирішується тим, що пропонується волоконно-оптичний датчик акролеїна складається з джерела інфрачервоного випромінювання, фотоприймача, оптичного фільтру, світловодів та фотоприймача. Відмінність датчика полягає у тому, що джерело випромінювання сполучене з двобічним оптичним розгалужувачем, первинна гілка якого містить оптичний фільтр та вимірювальний трубчатий світловод та вкритим віддзеркалюючим шаром торцем. Вторинна гілка містить контрольний світловод та оптичний фокон для сполучення світловоду з фотоприймачем. Обидві гілки розгалужувача сполучені з біметалевою пластиною.

Схематичне рішення пропонуваного датчику пояснюється кресленням (рис. 1).

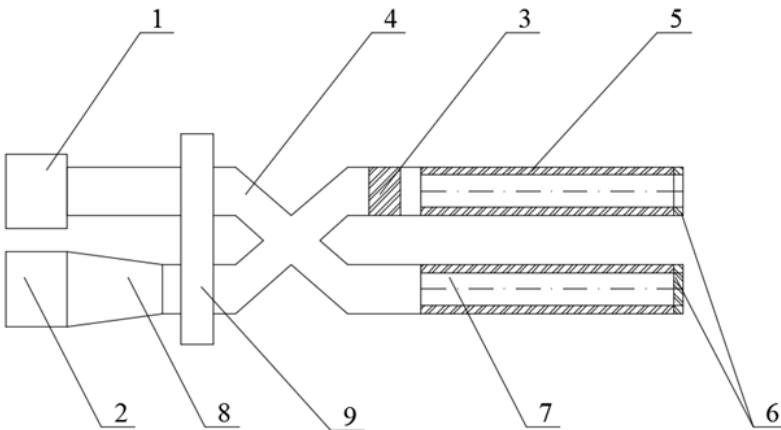


Рис. 1. Волоконно-оптичний датчик акролеїна: 1 – джерело інфрачервоного випромінювання; 2 – фотоприймач; 3 – оптичний фільтр; 4 – оптичний розгалужувач; 5 – вимірювальний трубчатий світловод; 6 – віддзеркалюючий шар; 7 – контрольний світловод; 8 – фокон; 9 – біметалева пластина

Первинна гілка містить оптичний фільтр 3, сполучений з вимірювальним трубчатим світловодом з вкритим віддзеркалюючим шаром торцем 5. Трубчатий світловод дозволяє збільшити зону

контакту оптичної поверхні та газового середовища при збереженні необхідного одномодового режиму роботи. Вторинна гілка розгалужувача містить контрольний світловод 6, торець якого також вритий віддзеркалюючим шаром, та оптичний фокон 7 для сполучення з фотоприймачем 2.

Світловоди первинної та вторинної гілок жорстко сполучені з біметалевою пластиною. Віддзеркалюючий шар на торцях вимірювального та контрольного світловодів служить для відбивання модульованого та первинного випромінювання. Тим самим скорочується довжина вимірювальної лінії та зникає необхідність застосування прохідних вимірювальної та порівняльної камер. Оптичний фільтр дозволяє виділити найбільш доцільну довжину хвилі, на якій проходить поглинання акролеїну. Застосування оптичного фільтру унеможливує вплив інших складових газової суміші. Оптичний фокон дозволяє виконати більш точне сполучення світловода та активної ділянки фотоприймача без додаткового юстирування. Біметалева пластина служить для створення попереднього вигину світловодів. Створений вигин ініціює додатковий витік випромінювання за межі світловода. При зростанні температури контрольованого середовища вигин пластини та попередньо створені втрати змінюються. Таким чином відбувається автоматичне коригування інформаційного сигналу відповідно до температурного впливу.

Подальша обробка випромінювання дозволить отримати електричний сигнал який буде пропорційний величині концентрації контрольованого газового середовища.

При появі з внутрішнього боку вимірювального світловоду акролеїну відбувається порушення умов повного внутрішнього відбивання світла, яке виникає як відклик на тунельне перекачування випромінювання з світловоду назовні [5, 6]. Порушення умов повного відбивання світла у вимірювальному світловоді знаходить своє відображення у зміні величини інтенсивності випромінювання, яке відбувається від віддзеркалюючого шару. Випромінювання повертається крізь розгалужувач до фотоприймача, де здійснюється реєстрація інформаційного сигналу [7 – 9]. Для вдосконалення властивостей приладу можуть бути застосовані альтернативні скломатеріали [10].

У статичному режимі (режим калібровки), тобто у відсутності газового середовища відмінного від атмосферного повітря, у джерелі випромінювання генерується випромінювання, яке крізь розгалужувач,

надходить до вимірювального та контрольного світловодів. У світловодах відбувається зменшення інтенсивності оптичного випромінювання, що проходить скрізь них, яке обумовлене затуханням у матеріалі світловодів під впливом експлуатаційних факторів. Інтенсивність випромінювання, що повертається до фотоприймача, фіксується і запам'ятовується як поправка.

У динамічному режимі (занурення у контрольоване газове середовище) при появі з внутрішнього боку вимірювального світловоду акролеїну відбувається порушення умов повного внутрішнього відбивання світла, яке виникає як відклик на тунельне перекачування випромінювання з світловоду назовні. Порушення умов повного відбивання світла у вимірювальному світловоді знаходить своє відображення у зміні величини інтенсивності випромінювання, яке відбивається від віддзеркалюючого шару.

Інтенсивність поглинання випромінювання акролеїном доцільно характеризувати в одиницях молярного коефіцієнта поглинання ε і УФ-спектр представляти у формі $\varepsilon = f(\lambda)$. Величина ε в електронних спектрах органічних молекул змінюється в дуже широкому інтервалі значень ($0 \dots 10^5$) і для зображення абсорбційної кривої в широкому спектральному діапазоні доцільно на осі ординат переходити на логарифмічну шкалу. Крива $\lg \varepsilon = f(\lambda)$ дає можливість наочно й з однаковою точністю представити на одному графіку ділянки спектра, що відрізняються по інтенсивності на кілька порядків (рис. 2) [11].

Аналіз залежності (рис. 2) вказує на те що найбільшою мірою, яка відповідає розв'язанню задачі газоаналізу у машинних приміщеннях, є обрання довжини хвилі випромінювання ~ 2 мкм.

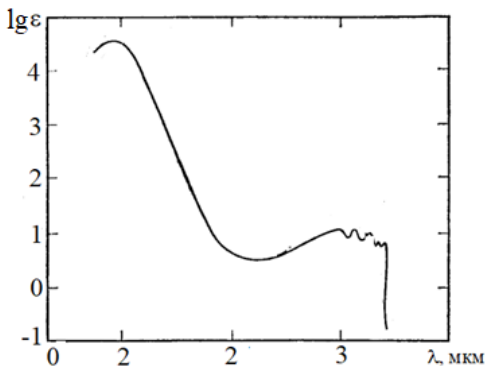


Рис. 2. Спектр поглинання акролеїну

Після цього, змінене за інтенсивністю випромінювання, відбивається від віддзеркалюючого шару та крізь відповідну гілку розгалужувача надходить до фотоприймача. У фотоприймачі рефлектометрі відбувається постійний контроль інтенсивності випромінювання.

Інтенсивність зареєстрованої частки світла буде пропорційна величині вимірюваного параметра газового середовища.

Як правило, фокони між тривимірними оптичними хвильоводами являють собою звуження тільки одного поперечного розміру хвильоводу в площині підложки хвильоводу (рис. 3).

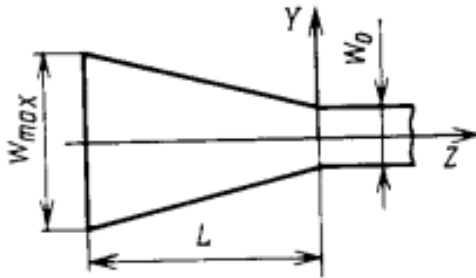


Рис. 3. Хвильоводний фокон

У фоконі зміна поперечного перерізу хвильоводу приводить до зв'язку хвильоводних мод один з одним і з модами випромінювання. В одномодових хвильоводах виникає зв'язок основної моди з модами випромінювання, і вона втрачає частину своєї потужності на випромінювання з хвильоводу. У багатомодових хвильоводах додатково виникає обмін потужністю між модами в процесі їх перетворення у фоконі. Потужність основної моди при цьому втрачається на генерацію паразитних мод і на випромінювання в прилягаюче середовище.

Аналіз фоконів на основі чисельного розв'язку рівнянь зв'язаних хвиль показує, що, як і у випадку хвильоводного переходу між тривимірними хвильоводами, втрати потужності через перетворення мод у моди вищого порядку й моди випромінювання можуть бути суттєво зменшені при збільшенні довжини хвильоводної структури L до величини $(10^3 \dots 10^4)\lambda$.

Аналіз модового зв'язку у фоконих із плавним профілем дозволив встановити їхню оптимальну форму та співвідношення розмірів, що

забезпечують мінімальні втрати на перетворення мод при коефіцієнті передачі потужності понад 90 %. Умова адиабатичності фокона, при якій втрати на перетворення основної моди у вищі моди надмалі, полягає в тому, що у всіх точках уздовж осі фокона кут Θ , утворений дотичною до поверхні рупора і його віссю в будь-якій точці на осі z , є

$$\Theta = a\lambda_b/2W, \quad (1)$$

де $\lambda_b = \lambda/n^*$ – довжина хвилі в оптичному хвилеводі для локальної моди нижчого порядку з ефективним показником заломлення n^* у будь-якій точці осі z ; W – локальна ширина фокона в тій же точці; $a \leq 1$ – постійна.

Фізичний зміст співвідношення (1) полягає в тому, що для усунення перетворення мод і втрат на випромінювання стінки фокона повинні розширюватися повільніше дифракційного розширення лучка для кожного значення на осі z .

З оглядом на умову (1) та те, що $2\Theta = |dW/dz|$, можна зазначити що найбільш доцільним є застосування параболічної форми фокону

$$W(z) = (2a\lambda_g |z| + W_0^2)^{0.5}, \quad (2)$$

де $W_0 = W(z=0)$.

Довжина параболічного рупора, при досить великих значеннях W_{\max} ($W_{\max} \gg W_0$), може бути визначена як

$$L = \frac{W_{\max}^2}{2a\lambda_g}. \quad (3)$$

Розрахунки втрат, обумовлених перетворенням мод у фоконних структурах, показує, що для фокону параболічної форми верхня межа втрат потужності, що вводиться до фокону, визначається величиною $(a/4)^2$. На практиці може бути доцільною апроксимація параболічної форми фокона трьома лінійними секціями, уписаними в параболу. У цьому випадку може бути отриманий коефіцієнт передачі потужності рупорної структури, близький до розрахункового.

При однаковій довжині фокону параболічна форма вносить менші втрати й дозволяє на практиці одержувати для основної моди коефіцієнт передачі потужності понад 90 %. Тому її застосування є більш доцільним ніж лінійної форми.

Порівняння рупорних структур різної форми показує, що у фоконі експонентної форми втрати оптичної потужності можуть бути ще менші. З (2) і (3) видно, що необхідна для виконання умови (1) довжина фокону значно зростає зі збільшенням перепаду поперечних розмірів

хвилеводів, що з'єднуються. Тому слід застосовувати фоконні структури з $W_{\max} < 50$ мкм [12].

Запропоноване схемотехнічне рішення волоконно-оптичного датчику акролеїну завдяки застосуванню оптичних елементів забезпечить такі складові технічного ефекту:

більш адекватну локалізацію появи акролеїна та перетворення параметрів газового середовища у зміни інформаційного сигналу;

компенсацію впливу дестабілізуючих факторів на вимірювальний канал датчику акролеїна;

можливість створення розгалуженої мережі контролю газового середовища в особливих умовах;

підвищення якості функціонування за рахунок використання матеріалів з близьким коефіцієнтом теплового поширення та обрання раціональної схеми модуляції опорного випромінювання;

пожежевибухобезпечність при застосуванні.

Таким чином запропоновано нове схемотехнічне рішення датчика визначення концентрації акролеїна у суднових машинних приміщеннях. На відміну від існуючих, запропоноване схемотехнічне рішення спроможне значним чином збільшити робочий діапазон та інваріантність до експлуатаційних факторів вимірювального засобу. Впровадження нового датчику дозволить забезпечити умови для захисту здоров'я екіпажу.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Katz, S. H., E. J. Talbert. Table 3. Intensities of odors versus concentrations in parts per million // Intensities of Odors and Irritating Effects of Warning Agents for Inflammable and Poisonous Gases. – Washington, D.C.: U.S. Bureau of Mines, U.S. Dept. of Commerce, 1980. – P. 14.

2. Патент РФ № 2556294, МПК G01N 30/02 (2006.1). Способ определения концентрации акролеина в атмосферном воздухе методом высокоэффективной жидкостной хроматографии/ Н. В. Зайцева, Т. С. Уланова, Т. Д. Карнажицкая, Е. О. Заверненкова; заявитель и владелец патента Федеральное бюджетное учреждение науки "Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения". – 2014114334/28. – заявл. 10.04.2014. – опубл. 10.07.2015, бюл. № 19. – 5 с.

3. Сандлер, А. К., Никольский, В. В., Хнюнин, С. Г. Использование волоконно-оптических устройств для предотвращения техногенных катастроф на судах // Автоматизация судовых технических средств. – 2004. – Вып. 9. – Одесса: ОНМА. – С. 82 - 90.

4. Патент України № 78611, МПК (2011) G01M 11/02 (2006.1). Волоконно-оптичний газоаналізатор/ Заявники та володарі патенту: Сандлер, А.К., Цюпко, Ю.М. – u201210906. – заявл. 18.09.2012. – опубл. 25.03.2013, бюл. № 6. – 3 с.

5. Кравченко, О. М. Підвищення селективності газового аналізу при вимірюванні концентрації аміаку // IV науково-практична конференція студентів та аспірантів "Погляд у майбутнє приладобудування". – К.: НТУУ "КПІ", 2011. – С. 214.

6. Снайдер, А., Лав, Д. Теория оптических волноводов. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.

7. Сандлер, А. К. Метод підвищення ефективності діагностування технічного стану суднових газотурбінних установок на основі волоконно-оптичних технологій: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / Київський університет інфраструктури та технологій. – К., 2021. – 20 с.

8. Sandler, A., Budashko, V., Khniunin, S., Bogach, V. Improving the mathematical model of a fiber-optic inclinometer for vibration diagnostics of elements in the propulsion system with sliding bearings // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Applied physics. – 2023. – Vol. 5. – № 5(125). – P. 24 - 31.

9. Сандлер, А. К., Логишев, И. В., Сандлер, А. А. Инвариантный волоконный акселерометр // Энергетика судна: эксплуатация та ремонт: матеріали науково-технічної конференції. – Одеса: ОНМА. – 2011. – С. 277 - 279.

10. Сандлер, А. К. Чувствительный элемент волоконно-оптического акселерометра на основе сапфирового стекла // IX міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 05-06 листопада 2019 р.: матеріали конференції. – Одеса: НУ"ОМА". – 2019. – С. 27 - 33.

11. Иоффе, Б. В., Костиков, Р. Р., Разин, В. В. Физические методы определения строения органических молекул. – Л.: Изд. Ленинград. Ун-та, 1976. – 344 с.

12. Семенов, А. С., Смирнов, В. Л., Шмалько, А. В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. – М.: Радио и связь, 1990. – 224 с.

***Abstract.** One of the directions that determine the improvement of the quality and reliability of information systems for monitoring the state of the air environment in the ship's engine room is the intellectualization of diagnostic information processing processes based on the technology of expert systems. Systems of this type make it possible to improve 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 organization of measurements based on individual observation of changes in the composition of the air mixture during operation through measurements carried out on a constant basis over long periods of time. But, in a certain way, the development of the mentioned systems is restrained by the imperfection of the corresponding gas analysis sensors. The goal of the work is to introduce the newest means of gas analysis to prevent the negative impact of dangerous substances on the health of the crew. The object of research is the processes of formation and transformation of the measuring signal in the means of gas analysis of the state of the air mixture in the ship's engine room. The subject of the research is fiber-optic means of measuring the concentration of the dangerous substance acrolein. It is proposed to solve the given problem due to the introduction of a new fiber-optic sensor. The difference of the sensor lies in the fact that the radiation source is connected to a two-way optical splitter, the primary branch of which contains an optical filter and a measuring tubular light guide, and the end is covered with a reflective layer. The secondary branch contains a control light guide and an optical focon for connecting the light guide to the photoreceptor. Both branches of the splitter are connected to a bimetallic plate.*

The creation of a fiber-optic sensor of the proposed design will make it possible to obtain a measuring tool that is invariant to the uncontrolled effects of destabilizing factors and has sufficient sensitivity to controlled parameters. The use of such a tool will contribute to the organization of permanent and long-term control of the air condition in the machine room.