



УДК 355.58

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЗАСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ГАЗУ ЯКИЙ ЗАСТОСУВУЄТЬСЯ В СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ

FIBER-OPTICAL DETERMINATION OF THE HEAT OF GAS COMBUSTION USED IN SHIP POWER PLANTS

Сандлер А. К.¹, Будашко В. В.², Карпілов О. Ю.³

Sandler A.¹, Budashko V.², Karpilov O.³

Національний університет "Одеська морська академія", Україна

National University "Odesa Maritime Academy", Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0709-0542>¹, <http://orcid.org/0000-0003-4873-5236>²,

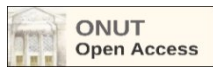
<https://orcid.org/0009-0005-7823-5787>³

E-mail: albertsand4@gmail.com¹, bvv@te.net.ua², kau.onma@gmail.com³

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.v%vi%i.3019

Анотація. Одним з напрямків, що визначають підвищення якості та вірогідності автоматизованих систем обліку газового середовища, є інтелектуалізація процесів обробки діагностичної інформації на основі технології експертних систем. Системи такого типу дозволяють забезпечити підвищення якості обліку контрольованого середовища на всіх ділянках паливної системи судна. Найбільш ефективною системою обліку витрат газового палива є система з методами організації вимірювань, що базуються на індивідуальному обліку руху газового потоку в процесі експлуатації шляхом вимірювань, проведених на постійній основі пліном тривалих періодів часу. Але, певним чином, розвиток згаданих систем стримується недосконалістю відповідних датчиків обліку газового палива. Ціль роботи полягає у впровадженні новітніх засобів вимірювання руху обсягів газу. Об'єктом дослідження є процеси формування й перетворення вимірювального сигналу у засобі обліку руху газових сумішей. Предметом дослідження є волоконно-оптичні засоби вимірювання обліку газу у суднових енергетичних установках. Пропонується вирішення поставленої задачі за рахунок впровадження нового волоконно-оптичного датчику в'язкості. Відмінність датчика полягає у тому, що складові датчика містяться у циліндричній основі - датчику тиску з кварцового скла, випромінювання надходить від джерела та повертається до фотоприймача від основного волоконно-оптичного світловоду через оптичний розгалужувач, основний та чутливий револьверний світловід є комбінованим світловодом з відбиваючим шаром на торцях з сапфірового скла та вкритому оболонкою, на якій закріплені профільовані лопаті для взаємодії з потоком рідини та створення деформації зсуву у чутливому револьверному світловоді, основний волоконно-оптичний світловід сполучений з оптичним розгалужувачем біскляним термокомпенсаційним світловодом зв'язку.

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 контролю газового палива у суднових енергетичних установках.

Abstract. One of the directions that determine the improvement of the quality and reliability of automated gas environment accounting systems is the intellectualization of diagnostic information processing processes based on expert systems technology. Systems of this type allow to ensure the improvement of the quality of accounting of the controlled environment in all parts of the ship's fuel system. The most effective system for accounting for gas fuel consumption is a system with methods for organizing measurements based on individual accounting of the gas flow during operation by means of 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 fuel accounting sensors. The aim of the work is to introduce the latest means of measuring the movement of gas volumes. The object of the study is the processes of forming and converting the measuring signal in the means of accounting for the movement



of gas mixtures. The subject of the study is fiber-optic means of measuring gas accounting in ship power plants. The proposed solution to the problem is based on the introduction of a new fiber-optic viscosity sensor. The sensor's difference is that the sensor components are contained in a cylindrical base - a pressure sensor made of quartz glass, the radiation comes from the source and returns to the photodetector from the main fiber-optic light guide through an optical splitter, the main and sensitive revolver light guide is a combined light guide with a reflective layer on the ends made of sapphire glass and covered with a shell, on which profiled blades are fixed for interaction with the fluid flow and creating shear deformation in the sensitive revolver light guide, the main fiber-optic light guide is connected to the optical splitter by a bi-glass thermally compensated communication light guide. The creation of a fiber-optic sensor of the proposed design will allow obtaining a measuring device that is invariant to uncontrolled influences of destabilizing factors and has sufficient sensitivity to controlled parameters. The use of such a device will contribute to the organization of constant and long-term control of gas fuel in ship power plants.

Ключові слова: газ, волоконно-оптичний датчик, облік, світловод

Key words: gas, fiber optic sensor, metering, fiber optic

Постановка проблеми в загальному вигляді. Аналіз світової тенденції підвищення цін на енергоносії, в тому числі на природний газ, підкреслює актуальність питання забезпечення необхідної точності та вірогідності обліку газу з врахуванням новітніх концепцій до реалізації процесу вимірювання. Міжнародний досвід і чинний в Україні національний стандарт вимагає реалізовувати облік газу інформаційно-вимірювальними системами (ІВС), які забезпечують вимірювання не тільки використаного об'єму газу з одночасним визначенням його теплоти згорання. Це дозволяє здійснювати облік газу в одиницях енергії і безпосереднім чином впливати на його вартість [1 - 3].

Невідкладність вирішення цього питання ґрунтується на положеннях запровадженого з 1 січня 2020 року національного стандарту [4], який регламентує дві системи створення пристроїв перетворення в енергію (ППЕ) облікованого об'єму природного газу. Ці ППЕ формують вхідну інформацію для обчислювача енергії і фактично є складовою частиною ІВС обліку енергії газу.

Перший тип системи ППЕ містить засіб визначення теплоти згорання (ЗВТЗ), який монтований локально та є складовою частиною ППЕ. Ця структура системи містить обчислювач енергії, який може використовувати згенерований сигнал від локально монтованого ЗВТЗ для визначення енергії.

Другий тип системи ППЕ не передбачає локального встановлення ЗВТЗ, а тільки застосовує його вихідний сигнал, як від зовнішнього перетворювача системи. При цьому також обчислювач може приймати для визначення енергії фіксоване значення сигналу теплоти згорання або яке періодично оновлюється.

Таким чином, при вимірюванні енергії газу обов'язковим є застосування ЗВТЗ.

Тому актуальною є розробка нових експрес-методів визначення теплоти згорання газу, які могли би бути реалізовані і у всіх елементах газотранспортної системи, у тому числі при застосуванні у суднових енергетичних установках [1 - 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно із стандартом [4] для визначення теплоти згорання газу застосовуються прямі і непрямі методи. Прямі методи полягають у використанні засобів вимірювання, за функціонування яких проводять спалювання газу і визначають кількість енергії, що утворилася при цьому. Непрямі методи передбачають визначення теплоти згорання газу на основі розрахункових методів при наявній інформації про компонентний склад газу. Спалювання газу при цьому не застосовується.

Найбільш поширеним непрямым методом визначення теплоти згорання природного газу є розрахунковий метод, що базується на використанні даних про компонентний склад природного газу, отриманих за допомогою хроматографічного аналізу.

Хроматографи в основному є лабораторними засобами і застосовуються у відповідних підрозділах газотранспортних і газопостачальних організацій для періодичного і поточного контролю якості природного газу.

Однак застосування хроматографічного методу для визначення теплоти згорання природного газу не може бути реалізоване при виконанні вимірювань безпосередньо у промислових чи побутових споживачів внаслідок дороговизни і складності технічної реалізації методу.

Вивчення сучасних технічних рішень у сфері вимірювання теплоти згорання природного газу показало, що наявною є обмежена кількість принципових підходів і схемних рішень для апаратурного вимірювання і експрес-контролю якості природного газу безпосередньо у газоспоживачів, серед яких можуть бути конкретизовані патентозахищені рішення [1, 3].

У [1] запропонований спосіб визначення теплоти згорання природного газу, який полягає у використанні інформативного параметра – температури спалювання. При реалізації способу повинно забезпечуватися згорання суміші заданого об'ємного співвідношення досліджуваного газу із повітрям при застосуванні пальника спеціальної конструкції. В межах дослідження проведено моделювання зміни коефіцієнта стисливості від в'язкості газу (рис. 1).

Отримані результати моделювання не суперечать відомим фізичним закономірностям, тобто із збільшенням в'язкості відбувається майже лінійне зростання теплоти згорання. Це моделювання також підтверджує про більший вплив на теплоту згорання зміни складової коефіцієнта стисливості від густини порівняно із складовою коефіцієнта стисливості від вмісту азоту і вуглекислого газу.



З оглядом на результати дослідження та для пошуку шляхів поліпшення метрологічних характеристик пристроїв контролю обліку газу проаналізовані саме конструкції новітніх датчиків в'язкості газу.

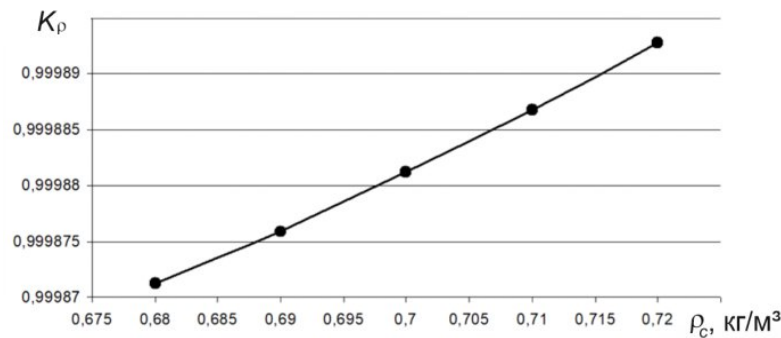
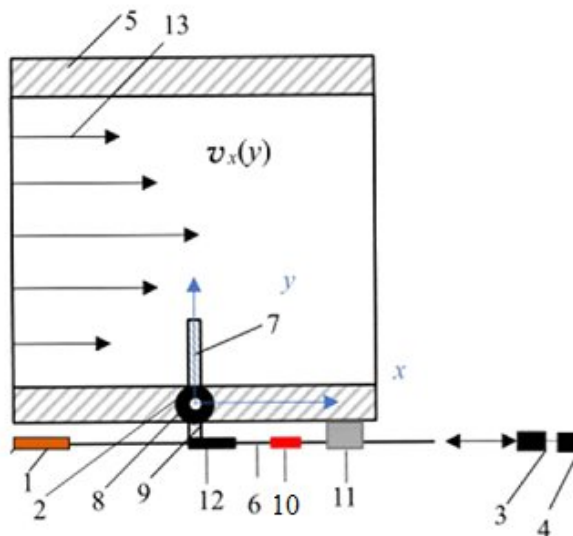


Рис. 1. Результати моделювання залежності теплоти згоряння від в'язкості газу
Fig. 1. Results of modeling the dependence of the heat of combustion on gas viscosity

Волоконно-оптичний датчик в'язкості, розміщений усередині труби, містить з'єднані за допомогою волоконного світловоду джерело випромінювання, виконане з можливістю перемикання робочої довжини хвилі, чутливий елемент і фотоприймач, що входить у блок обробки інформації (рис. 2) [5]. Чутливий елемент, виконаний з оптичного волокна на якому записані волоконні ґрати Бреґґа (ВБґ), і прикріпленого до оптичного волокна важільця, призначеного для передачі зусилля від вимірюваного середовища до волокна. При цьому одна частина важільця розташована в трубі, а інша частина важільця й оптичне волокно чутливого елемента розташовані поза трубою.

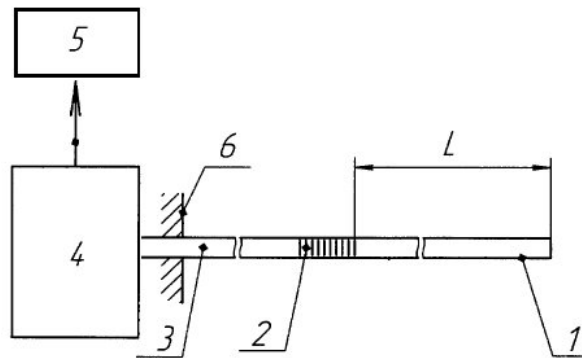
При обтіканні оптичного волокна потоком газу на його поверхні розвивається дотична сила внутрішнього тертя. Сила тиску середовища передається нижнім плечем активатора на рухливе кріплення. Нерухомим кріпленням закріплене волокно, по якому спрямоване випромінювання. Робоча довжина хвилі світлового пучка визначається джерелом випромінювання. Зміна геометричних розмірів ВБґ (подовження або стиск) створює пропорційну зміну показника переломлення, періоду ВБґ і зсув довжини відбитого сигналу.



1 - джерело випромінювання; 2 - чутливий елемент; 3 - фотоприймач; 4 - блок обробки інформації; 5 - труба; 6 - оптичне волокно; 7 - верхнє плече активатора; 8 - шарнір; 9 - нижнє плече активатора; 10 - волоконні ґрати Бреґґа; 11 - нерухоме кріплення; 12 - рухоме кріплення; 13 - контрольоване середовище

Рис. 2. Волоконно-оптичний датчик в'язкості
Fig. 2. Fiber optic viscosity sensor

Інший відомий датчик складається із зануреного в потік чутливого світловоду, на поверхні якого тангенціальна напруга в'язкісного тертя створює розтягувальну силу, передану на ВБґ і перетворену в ґратах деформацію волокна у зміну вихідного оптичного сигналу (рис. 3) [6]. Відбитий ВБґ сигнал надходить по сигналу світловоду зв'язку у зовнішній, багатоканальний блок обробки інформації (інтеррогатор), звідки оброблений сигнал передається на пульт оператора або систему автоматичного керування технологічним процесом. Вузол закріплення волокна запобігає його сповзанню у вимірюване середовище.



1 - чутливий світловод; 2 - волоконні ґрати Брегга; 3 - світловод зв'язку; 4 - блок джерела випромінювання та фотоприймача; 5 - блок обробки інформації; 6 - вузол закріплення

Рис. 3. Волоконно-оптичний датчик для безперервного виміру в'язкості текучого середовища

Fig. 3. Fiber optic sensor for continuous measurement of fluid viscosity

У обох конструкціях датчиків передбачено застосування ВГБ. Поряд з відомими перевагами застосування ВГБ, існує ряд чинників, певним чином впливаючих на характеристики та можливості вимірювальних пристроїв. До них, більшою мірою відносяться саме такі:

- ВГБ, формовані випромінюванням ексимерного лазера з використанням фазових масок, мають обмеження по температурному діапазону, обумовлене високотемпературною деградацією спектра записаних ВГБ;

- використовувані для запису ВГБ оптичні волокна значно дорожче у виробництві в порівнянні зі стандартними. Необхідність тривалої витримки оптичного волокна у водні для поліпшення якості формування гетероструктур вимагає від виробника істотного тимчасового резерву на підготовку оптичних волокон. Наявність додаткових витрат і площ для придбання, установки і експлуатацію спеціального технологічного устаткування;

- можливість однієї маски формувати певний період ВГБ обмежує можливий діапазон довжини хвиль відбитого сигналу ВГБ датчика. Як наслідок, існує потреба виготовлення значної кількості фазових масок або формування тільки типових сенсорів для експлуатації в обмеженому спектральному діапазоні без обліку особливостей і індивідуальних технічних вимог енергетичної установки;

- технологічні операції по видаленню/відновленню захисного покриття оптичного волокна не тільки значно ускладнюють процес виробництва ВГБ, але й сполучені з ризиком деструкції волокна. Крім погрози механічного ушкодження, оптичне волокно без захисного покриття руйнується під впливом вологи навколишнього середовища [7]

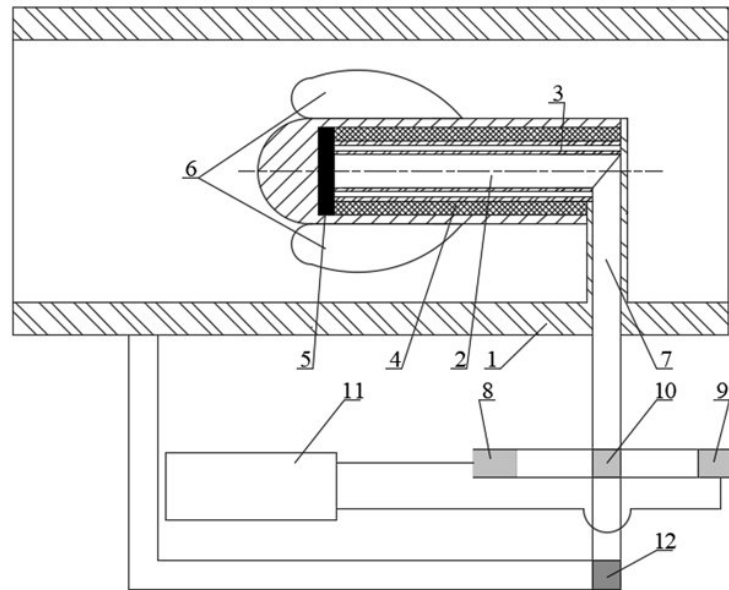
Що стосується розглянутих конструкцій то слід зазначити, що наявність шарніра вимагає впровадження додаткових заходів щодо ущільнення трубопроводу, що певним чином негативно впливає на передаточну характеристику ланки "верхнє плече активатора – шарнір - нижнє плече активатора"; відсутня можливість компенсації впливу температури контрольованого та навколишнього середовищ; датчик потребує додаткової інформації щодо тиску контрольованого середовища.

Постановка завдання. Мета дослідження – вирішення науково-технічного завдання, яке створено запитом практики та полягає у створенні волоконно-оптичного датчику в'язкості газу, який є більш інваріантним до дестабілізуючих експлуатаційних факторів, має зменшену, у порівнянні з аналогами, вартість, у якому передбачено одночасне вимірювання тиску контрольованої газової суміші, та одночасно збережені високий рівень чутливості та швидкодія пристроїв відомих типів.

Викладення матеріалу дослідження. Запропонована конструкція датчику обліку газу пояснюється кресленням (рис. 4), де зображено основи - датчику тиску 1, який виконаний з кварцового скла [8]. В основі містяться основний волоконно-оптичний світловод 2, коаксіально до якого розташований чутливий револьверний світловод 3, які мають відбиваючі шари 5 з сапфірового скла на торцях. Обидва світловоди вкриті єдиною оболонкою 4. На оболонці розташовані профільовані лопаті 6. Основний світловод сполучений з біскляним термокомпенсаційним світловодом зв'язку 7. Біскляний термокомпенсаційний світловод зв'язку сполучений з оптичним розгалужувачем 10, який отримає випромінювання від джерела 8 у прямому напрямку, та передає випромінювання до фотоприймача 9 у зворотному напрямку. Від оптичного розгалужувача у прямому та зворотному напрямках випромінювання надходить до основи - датчику тиску, але гілка розгалужувача має оптичний фільтр 12. Джерело випромінювання та фотоприймач сполучені з блоком обробки інформації 11.

У статичному режимі (калібрування при відсутності потоку газу) у блоці обробки інформації фіксуються відповідні данні та поправки, що враховують температуру навколишнього середовища та втрати в усіх елементах вимірювальної системи.

У динамічному режимі (вимірювання), після впливу струму газу на профільовані лопаті у основі відбувається динамічна деформація зсуву оболонки, яка жорстко сполучена з чутливим револьверним світловодом. Ця деформація викликає аналогічний процес у чутливому револьверному світловоді. В наслідок деформації зсуву у чутливому світловоді відбувається зміна його показника заломлення.



1 – основа - датчик тиску; 2 – основний волоконно-оптичний світловод; 3 – чутливий револьверний світловод; 4 – оболонка; 5 – відбиваючий шар з сапфірового скла; 6 – профільовані лопаті; 7 – біскляний термокомпенсаційний світловод зв'язку; 8 – джерело випромінювання; 9 – фотоприймач; 10 – оптичний розгалужувач; 11 – блок обробки інформації; 12 – оптичний фільтр.

Рис. 4. Волоконно-оптичний датчик в'язкості

Fig. 4. Fiber optic viscosity sensor

Зміни, що відбуваються, викликають порушення умов повного відбивання світла у світловоді та ініціюють тунелювання частки випромінювання з основного світловоду до чутливого світловоду. Таким чином, частка світла випромінюється за межі основного світловоду [9 - 11].

Частка випромінювання, що зберіглася у основному світловоді відбивається від шару сапфірового скла та повертається через оптичний розгалужувач до фотоприймача.

Частка випромінювання, що буде зафіксована, буде пропорційна величині в'язкості газу у трубопроводі з компенсованим впливом неконтрольованих експлуатаційних факторів. Величина зареєстрованої частки випромінювання визначається як [11, 12]:

$$P_R = \frac{P_0}{n} \cdot \frac{\sin^2 CnL \sqrt{\frac{1}{2} + ((b_R + b_E + b_H) - (b_T + b_E + b_H)) / 2Cn^2}}{\frac{1}{2} + ((b_R + b_E + b_H) - (b_T + b_E + b_H)) / 2Cn^2} \cdot P_0$$

де P_0 – сумарна потужність, уведена в коаксіальну структуру; C – коефіцієнт оптичного зв'язку основного та чутливого світловодів; b_R – стала поширення у першій серцевині; b_T – постійна поширення у другій серцевині; b_E – збільшення постійної поширення через еліптичність коаксіальної структури; b_H – збільшення постійної поширення через збурювання, що порушують циркулярну симетрію коаксіальної структури; L – довжина чутливого револьверного світловода; n – кількість світловодних каналів у чутливому револьверному світловоді.

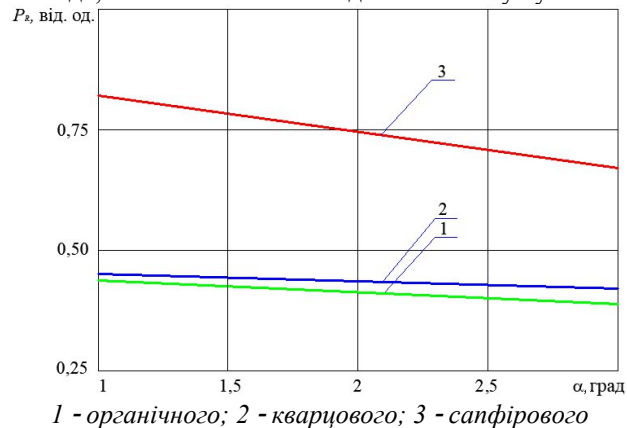


Рис. 5. Залежність величини вихідної оптичної потужності від величини кута крутіння для скла
Fig. 5. Dependence of the value of the output optical power on the value of the angle of rotation for glass

У якості матеріалу, що забезпечує необхідні механічні характеристики системи "основний світловод – чутливий світловод", при знаходженні у припустимому діапазоні геометричних розмірів, найбільше раціонально



використовувати стекла на основі штучного сапфіру (рис. 5). Сапфіровий світловод, який практично не має механічного гістерезису дозволить підвищити чутливість та стабільність.

Данні щодо тиску контрольованого середовища, які надходять з основи-датчику тиску, застосовуються у якості поправки до результатів вимірювання в'язкості газу у трубопроводі.

Для компенсації впливу температури навколишнього середовища на елементи пристрою застосовується біскляний термокомпенсаційний світловод зв'язку, який пропорційно температурі, змінює свій вигин та змінює заздалегідь внесені втрати випромінювання у світловоді.

Таким чином, відбувається повний цикл вимірювання.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Запропонований датчик є актуальними для впровадження, однак конкретні варіанти його застосування повинні бути техніко-економічно обґрунтовані внаслідок суттєвої різниці між ними в особливостях технічної реалізації, рівнях метрологічної точності функціонування і умовах застосування згідно поставлених завдань при вимірюванні кількісних характеристик газу.

Запропонований патентозахищений засіб обліку газу характеризується реалізацією прямого методу вимірювання і достатньою простотою конструкції. Цей засіб підвищує точність і вірогідність обліку газу з можливістю його реалізації безпосередньо у суднових енергетичних установках, що сприяє суттєвій економії затрат на проведення вимірювань без матеріально затратних операцій відбору проб газу і їх транспортування до відповідних лабораторій з контролю якості. Засіб дозволяє визначати теплоту згорання одоризованого газу за величиною його в'язкості, що при застосуванні хроматографічного методу аналізу є недопустимим, і вимірювати теплоту згорання вологого газу будь-якого компонентного складу, в тому числі за наявності неуглеводневих компонентів із забезпеченням необхідної точності вимірювання і допустимої величини похибки.

Технічний ефект досягається завдяки тому, що комбінація оптико-механічних елементів забезпечує:

- більшу інваріантність до дестабілізуючих експлуатаційних факторів;
- зменшену, у порівнянні з аналогами, вартість;
- одночасне вимірювання тиску контрольованої газової суміші;
- підвищену чутливість та точність приладу.

Розроблений датчик може бути виконаний у локальному виконанні, тобто пристосованим до контролю фізичної величини у фіксованій точці енергетичної. Однак, технологія мультиплексування дає можливість об'єднання однорідних або різномірних волоконно-оптичних датчиків, у тому числі й у розподілені в просторі системи. Це надасть додаткову вигоду у вартості вимірювальних пристроїв і можливість їх інтеграції в загальну судову інформаційно-вимірювальну систему [13 - 15].

Для більш детального дослідження доцільним є використання програми System Identification Toolbox для визначення параметрів моделі датчика за його перехідними характеристиками, отриманими в активному експерименті [16].

Список використаних джерел

1. Малісевич, Н. М., Середюк, О. Є. Моделювання впливу теплоти згорання природного газу на вимірювання його витрати торцевими соплами // Перспективні технології та прилади. - 2020. - Вип. № 16. - С. 63 - 72 с.
2. Малісевич, Н. М., Середюк, О. Є. Дослідження впливу конструктивних факторів на технічну реалізацію методу експрес-контролю теплоти згорання природного газу // Перспективні технології та прилади. - 2019. - № 15. - С. 81 - 89.
3. Середюк, О. Є., Малісевич, Н. М. Аналіз патентозахищених технічних рішень у сфері визначення теплоти згорання природного газу // Методи та прилади контролю якості. - 2018. - № 1 (40). - С. 58 - 69.
4. ДСТУ EN 12405-2:2018 (EN 12405-2:2012, IDT). Лічильники газу. Пристрої перетворювання. Частина 2. Перетворювання в енергію. - Київ: ДП "УкрНДНЦ", 2019. - 46 с.
5. Волоконно-оптический датчик вязкости. URL: https://patentscope.wipo.int/search/detail.jsf?docId=425414213&_cid=P22-M4R2GK-50423-1
6. Волоконно-оптический датчик для непрерывного измерения вязкости текучей среды. URL: https://patentscope.wipo.int/search/ru/detail.jsf?docId=337726450&_cid=P11-M4NXZX-78446-1.
7. 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.
8. Сандлер, А. К., Сандлер, А. А. Волоконно-оптический датчик давления для высокотемпературных систем топливподготовки // Судовые энергетические установки. - 2009. - Вып. 23. - Одесса: ОНМА. - С. 17 - 22.
9. Сандлер, А. К. Інформаційно-вимірювальні пристрої на основі волоконно-оптичних технологій. - Одеса: Видатінформ НУ "ОМА", 2018. - 165 с.
10. Патент України № 62437. МПК (2011) G01M 11/00. Інваріантний волоконний акселерометр // заявники та володарі патенту А. К. Сандлер, О. А. Сандлер. - заявл. 02.02.2011; опубл. 26.10.2011, бюл. № 18. - 3 с.
11. 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.
12. Снайдер, А., Лав, Д. Теория оптических волноводов. - М.: Радио и связь, 1987. - 656 с.
13. Сандлер, А. К., Опрышко, М. О. Волоконно-оптический датчик контроля состояния технических жидкостей



- и газов // X міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 24.11.2020 - 25.11.2020 р.: матеріали конференції. – Одеса: НУ "ОМА". – 2020. – С. 63 - 68. DOI:10.31653/2706-7874.SEEEA-2020.11.1-245.
14. Сандлер, А. К., Карпілов, О. Ю., Удолатій, В. Б. Волоконно-оптичний пристрій для систем автоматизованого екологічного моніторингу // Automation of Technological and Business Processes. - 2024. - № 16 (3). - P. 95 - 99. <https://doi.org/10.15673/atbp.v16i3.2880>.
15. Сандлер, А. К., Данчук, Д. П. Засіб підвищення ефективності моніторингу стану вантажу на суднах-газовозах на основі волоконно-оптичних технологій // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2021. – Т. 13. – №. 4. – С. 18 - 26. DOI: 10.15673/atbp.v13i4.2202.
16. Левінський, М. В., Левінський, В. М. Параметрична ідентифікація моделі об'єкта керування за ре-зультатами активного експерименту // Automation of technological and business processes. – 2023. – Т. 15. - № 2. – P. 35 - 40. DOI: 10.15673/atbp.v15i2.2523.

References

1. Malisevich, N. M., Seredyuk, O. YE. Modelyuvannya vplyvu teploty zhoryannya pryrodnoho hazu na vymiryuvannya yoho vytraty tortsevymy soplamy // Perspektyvni tekhnolohiyi ta prylady. - 2020. – Vyp. № 16. – P. 63 - 72.
2. Malisevich, N. M., Seredyuk, O. YE. Doslidzhennya vplyvu konstruktyvnykh faktoriv na tekhnichnu rea-lizatsiyu metodu ekspres-kontrolyu teploty zhoryannya pryrodnoho hazu // Perspektyvni tekhnolohiyi ta prylady. - 2019. - № 15. - P. 81 - 89.
3. Seredyuk, O. YE., Malisevych, N. M. Analiz patentozakhyschenykh tekhnichnykh rishen' u sferi vyznachennya teploty zhorannya pryrodnoho hazu // Metody ta prylady kontrolyu yakosti. - 2018. - № 1 (40). - P. 58 - 69.
4. DSTU EN 12405-2:2018 (EN 12405-2:2012, IDT). Lichyl'nyky hazu. Prystroyi peretvoryuvannya. Cha-styna 2. Peretvoryuvannya v enerhiyu. - Kyiv: DP "UkrNDNTS", 2019. - 46 p.
5. Volokonno-optychesky datchyk vyazkosti. URL: https://patentscope.wipo.int/search/detail.jsf?docId=425414213&_cid=P22-M4R2GK-50423-1.
6. Volokonno-optychesky datchyk dlya nepreryvnoho yzmerennya vyazkosti tekuchey sredi. URL: https://patentscope.wipo.int/search/ru/detail.jsf?docId=337726450&_cid=P11-M4NXZX-78446-1.
7. 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.
8. Sandler, A. K., Sandler, A. A. Volokonno-opticheskiy datchik davleniya dlya vysokotemperaturnykh sistem toplivopodgotovki // Sudovyye energeticheskiye ustanovki. – 2009. – Vyp. 23. – Одеса: ONMA. – P. 17 - 22.
9. Sandler, A. K. Informatsiyno-vymiryuval'ni prystroyi na osnovi volokonno-optychnykh tekhnolohiy. – Одеса: Vydainform NU "OMA", 2018. – 165 p.
10. Patent Ukrayiny № 62437. MPK (2011) G01M 11/00. Invariantnyy volokonnyy akselerometr // zayavnyky ta volodari patentu A. K. Sandler, O. A. Sandler. – zayavl. 02.02.2011; opubl. 26.10.2011, byul. № 18. - 3 p.
11. Sandler, A. K. Metod pidvyshchennya efektyvnosti diahnostuvannya tekhnichnoho stanu sudnovykh ha-zoturbinnnykh ustanovok na osnovi volokonno-optychnykh tekhnolohiy: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.20 / Kyyivs'kyy universytet infrastruktury ta tekhnolohiy. – K., 2021. – 20 p.
12. Snayder, A., Love, D. Teoriya optycheskykh volnovodov. – M.: Radio y svyaz', 1987. – 656 p.
13. Sandler, A. K., Opryshko, M. O. Volokonno-optychesky datchyk kontrolya sostoyannya tekhnicheskyykh zhydkostey y hazov // X mizhnarodna naukovometodychna konferentsiya "Sudnova elektroinzheneriya, elektronika i avtomatyka", 24.11.2020 - 25.11.2020 r.: materialy konferentsiyi. – Одеса: НУ "ОМА". – 2020. – P. 63 - 68. DOI:10.31653/2706-7874.SEEEA-2020.11.1-245.
14. Sandler A. K., Karpilov O. YU., Udolatiy V. B. Volokonno-optychnyy prystriy dlya system avto-matyzovanoho ekolohichnoho monitorynhu // Automation of Technological and Business Processes. - 2024. - № 16 (3). - P. 95 - 99. <https://doi.org/10.15673/atbp.v16i3.2880>.
15. Sandler, A. K., Danchuk, D. P. Zasib pidvyshchennya efektyvnosti monitorynhu stanu vantazhu na sud-nakh-hazovozakh na osnovi volokonno-optychnykh tekhnolohiy // Avtomatyzatsiya tekhnolohichnykh i biznes-protsesiv. – 2021. – Т. 13. – №. 4. – P. 18 - 26. DOI: 10.15673/atbp.v13i4.2202.
16. Levins'kyy, M. V., Levins'kyy, V. M. Parametrychna identyfikatsiya modeli ob'yekta keruvannya za re-zul'tatamy aktyvnoho eksperymentu // Automation of technological and business processes. – 2023. – Т. 15. - № 2. – S. 35 - 40. DOI: 10.15673/atbp.v15i2.2523.