DOI: 10.31653/smf52.2026.97-106

дата першого надходження: 24.01.26
дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.02.26
дата публікації: 05.05.26

Сандлер А.К., Опришко М.О.

[1]ORCID 0000-0002-0709-0542, [2]ORCID 0000-0002-9385-8676

Національний університет «Одеська морська академія»

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ ВІЗКОЗІМЕТР ДЛЯ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Постановка проблеми в загальному вигляді. Постійні коливання світових цін на вуглеводневе паливо для двигунів внутрішнього згоряння, разом із непередбачуваністю завантаження суден через торгові війни та санкції, висувають нові виклики щодо ефективного використання паливних ресурсів. Це включає перехід на часткові режими роботи двигунів внутрішнього згоряння, модернізацію конструкцій корпусу суден та інші заходи. До того ж дедалі значущішими стають вимоги до зменшення шкідливих викидів суднових малообертових двигунів, які використовують "важке" паливо чи суміші різних фракцій.

Зниження експлуатаційних витрат і екологічного впливу суднових двигунів, особливо дизелів, що працюють на "важкому" паливі, досягається завдяки конструктивним змінам, а також впровадженню електронного управління процесами упорскування палива. Поряд із цим триває вдосконалення систем регулювання в’язкості "важкого" палива, яке має різні характеристики динамічної в’язкості навіть за умов однакових температур для ідентичних марок. Окрім того, ці технічні рідини можуть проявляти властивості "неньютонівських" матеріалів із тиксотропними ефектами в триботехнічних вузлах двигуна. "Неньютонівські" властивості проявляються у зменшенні в’язкості при збільшенні швидкості зсуву, тоді як тиксотропні характеристики виявляються у зменшенні в’язкості з часом під постійною швидкістю деформації. Наприклад, підвищення в’язкості палива за інших однакових умов погіршує якість розпилювання, створює проблеми для роботи прецизійних пар паливних насосів, сприяє посиленню утворення нагару на деталях циліндро-поршневої групи і газоповітряного тракту, а також впливає на моменти подачі палива. Навпаки, зниження в’язкості призводить до розширення кута розпилю-

вання та скорочення довжини факела, що при існуючій конструкції форсунок і камер згоряння ускладнює формування оптимальної паливо-повітряної суміші та збільшує витрати палива. Окрім регулювання в'язкості палива, існує також гостра проблема з підтримкою оптимальної в'язкості мастильних рідин у циркуляційних системах. "Неньютонівські" тиксотропні рідини у фрикційних вузлах можуть суттєво впливати на рівень змащування елементів ЦПГ, збільшувати коефіцієнт тертя, скорочувати моторесурс і навіть генеруючи аварійні ситуації в роботі об'єктів енергетичної установки.

При цьому автоматичні системи для регулювання в'язкості палива вже широко використовуються на суднах, але технології для аналогічного регулювання в мастильних системах наразі не отримали належного розвитку [1 - 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день розроблено безліч різних типів віскозиметрів, проте багато з них висувають специфічні вимоги до характеристик контрольованої рідини і мають обмежений динамічний діапазон. До того ж більшість пристроїв відрізняється складною механічною конструкцією, що значно збільшує гідродинамічний опір потоку. Волоконно-оптичні віскозиметри виділяються своїми незаперечними перевагами, такими як відсутність електричних струмів і напруги у чутливій зоні приладу, стійкість до зовнішніх електромагнітних впливів, а також абсолютна екологічність, безпека для навколишнього середовища та виключення ризику пожеж і вибухів [4 - 6].

Відомий п'єзоелектричний віскозиметр, який містить реверсивний лінійний п'єзоелектричний двигун з осцилятором та оптичними датчиками представлений на рис. 1 [7].

Недоліки пристрою, які обумовлені застосуванням лінійного п'єзоелектричного двигуна полягають у такому:

- наявність електричних ліній живлення та поверхонь тертя;
- необхідність постійної підтримки геометрії вимірювальної камери в умовах впливу експлуатаційних факторів;
- необхідність додаткових оптичних датчиків для забезпечення роботи приладу;
- відсутність термокомпенсації впливу контрольованого та навколишнього середовищ.

Більш досконалим є п`єзооптичний віскозиметр, основу якого складають сенсорний елемент з кварцового волокна та п`єзокерамічний генератор коливань (рис. 2) [8].

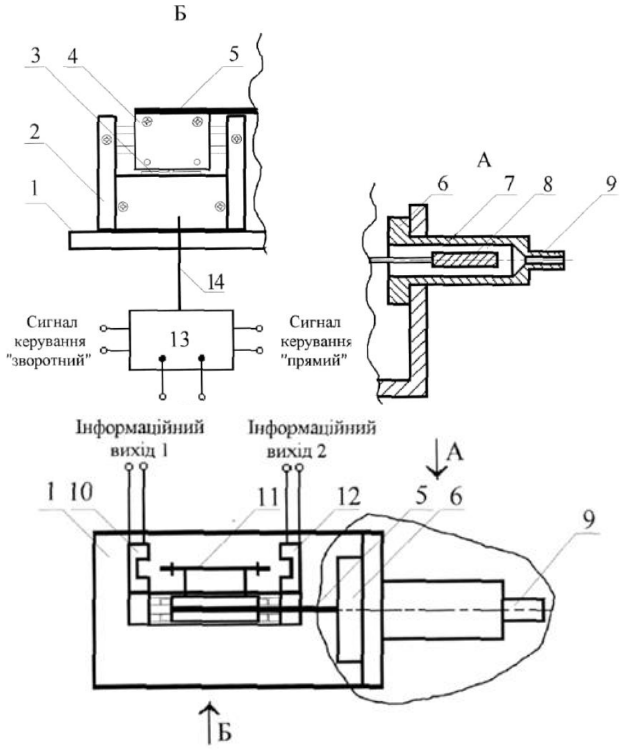

Рис. 1. П'єзоелектричний віскозиметр: 1 – основа; 2 – реверсивний лінійний п'єзоелектричний двигун; 3 – осцилятор двигуна; 4 – рухома частина; 5 – напрямна; 6 – вимірювальний зонд; 7 – вимірювальна камера; 8 – поршень; 9 – штуцер; 10, 12 – оптичні датчики; 11 – шторка; 13 – перетворювач напруги; 14 – кабель

У той же час можливості пристрою суттєво обмежують особливості, обумовлені наявністю електричних ліній енергопостачання і розташуванням вимірювального світловода сенсорного елемента, а саме:

- необхідність додаткових заходів щодо захисту світловода сенсорного елемента від впливу коливальних процесів, що генеруються судновим обладнанням, з частотами близькими до робочих частот віскозиметра;
- необхідність ретельного позиціонування світловода сенсорного елемента щодо осьової лінії потоку контрольованого середови-

ща;

- неможливість урахування впливу експлуатаційних факторів на результати вимірювання;
- відсутність термокомпенсації впливу контрольованого та навколишнього середовищ;
- складність заміни та очищення світловоду.

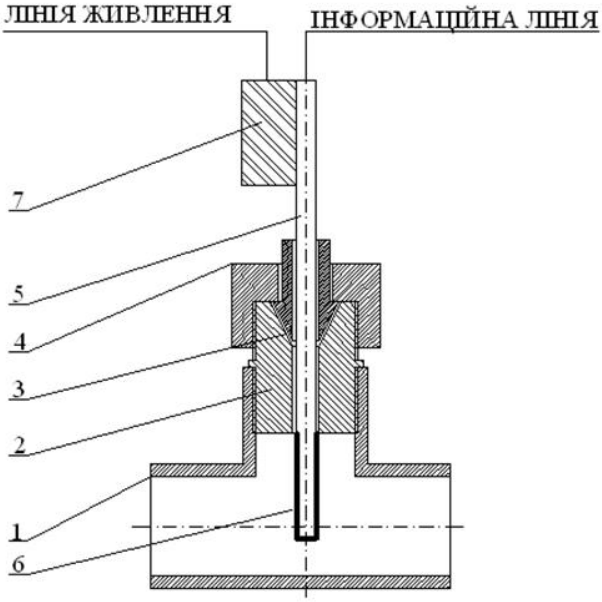

Рис. 2. П`єзооптичний віскозиметр: 1– корпус, 2 – ввід, 3 – термоусадочна герметична муфта, 4 – фіксуюча гайка, 5 – сенсорний елемент з кварцового волокна, 6 – віддзеркалюючий шар, 7 – п`єзокерамічний генератор коливань

Постановка завдання. Таким чином, схемотехнічних рішень в області волоконно-оптичних віскозиметрів, які повною мірою задовольняють вимогам до якості вимірювання змащувальних матеріалів, до останнього часу не було відомо. Таким чином, розробка та дослідження нового волоконно-оптичного віскозиметра є актуальним науково-технічним завданням.

Виклад основного матеріалу дослідження. Аналіз конструкцій відомих віскозиметрів дозволив конкретизувати вимоги до нового

схемотехнічного рішення вимірювального пристрою. Для усунення недоліків, властивих [7, 8] у розроблюваному віскозиметрі:

вимірювальний та контрольний оптичні канали розташовані в ідентичних умовах щодо потоку контрольованої рідини;

відсутні електричні лінії енергопостачання;

є можливість компенсації коливань температури зовнішнього середовища;

збережено надійність, чутливість та простота схемотехнічних рішень віскозиметрів відомих типів.

Відповідно до вищевикладених вимог розроблено модернізований волоконно-оптичний віскозиметр. Схему вимірювального пристрою наведено на рис. 3.

Для реалізації схемотехнічного рішення застосовано комбінацію оптико-механічних елементів.

У статичному режимі, коли потік мастила відсутній, у блоці реєстрації записуються дані та коригування, що враховують температуру навколишнього середовища, а також втрати у всіх складових вимірювальної системи.

У динамічному режимі вимірювання випромінювання джерела проходить через мультіплексор, де відбувається поділ на дві довжини хвиль, після чого потрапляє в основний і контрольний світловоди. Під впливом потоку рідини на профільовані лопаті основи виникає динамічна деформація зсуву, яка передається на пов'язаний із основою чутливий світловод. Ця деформація породжує аналогічні зміни у коаксіальному чутливому світловоді. В наслідок деформації зсуву світловоду змінюється його показник заломлення, що зумовлює порушення умов повного внутрішнього відбиття світла. Це викликає тунелювання частини випромінювання з основного світловода до чутливого. Отже, частина світла виходить за межі основного світловода. У контрольному світловоді реєструються лише втрати випромінювання, пов'язані з впливом зовнішніх дестабілізуючих факторів [9 - 11].

Частина випромінювання, яке не залишає основного та чутливого світловодів, відбивається від шару сапфірового скла і повертається через демультіплексор та відповідну гілку розгалужувача до фотоприймача [12].

Сигнали, що надходять у фотоприймач від основного та додаткового світловодів, компаруються у блоці обробки.

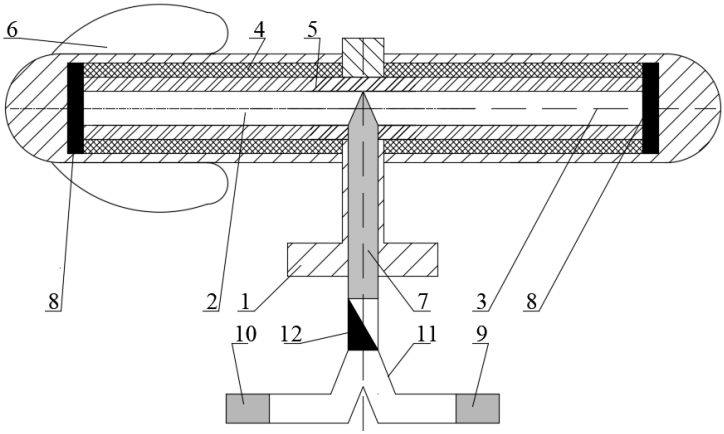

Рис. 3. Волоконно-оптичний віскозиметр: 1 - основа; 2 – основний світловод; 3 – контрольний світловод; 4 – оболонка; 5 – чутливий світловод; 6 – профільовані лопаті; 7 – термокомпенсаційний біскляний світловод; 8 – віддзеркалюючий шар з сапфірового скла; 9 – джерело випромінювання; 10 – фотоприймач; 11 – волоконно-оптичний розгалужувач; 12 - мультіплексор/демультіплексор

Відносна потужність, яка залишиться у основному світловоді, має майже лінійну залежність від кута крутіння світловода (рис. 4).

Для врахування впливу температури навколишнього середовища на компоненти пристрою використовується термокомпенсаційний світлодіод. Його вигин змінюється пропорційно до температури, що дозволяє компенсувати заздалегідь внесені втрати випромінювання у світловоді.

В результаті сигнал, що отримується, буде пропорційний величині в'язкості контрольованого середовища в трубопроводі, при цьому вплив неконтрольованих експлуатаційних факторів буде компенсовано.

Пропонована конструкція віскозиметра характеризується тим, що основний і контрольний елементи є єдиним світловодом, виготовленим із сапфірового скла, а коаксіально з ним розташовується чутливий світловод. Крім того, у вимірювальну схему введено термокомпенсаційний біскляний світловод.

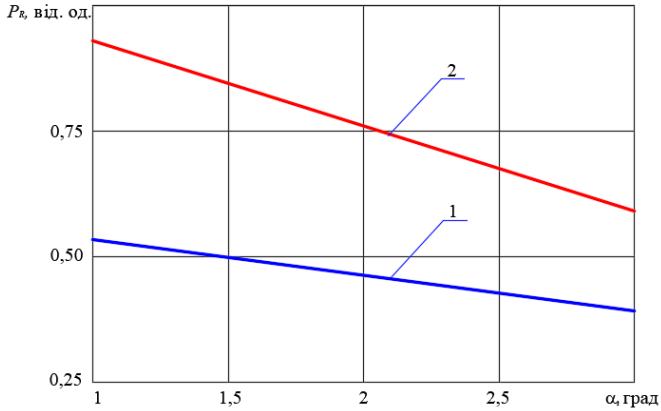

Рис. 4. Залежність відносної оптичної потужності, яка залишиться у основному світловоді, від кута крутіння світловода, який виконано з: 1 – кварцового скла; 2 – сапфірового скла [9]

Висновки. Розроблений вимірювальний пристрій має наступні переваги:

- компенсація впливу неконтрольованих експлуатаційних факторів на результати вимірів;
- відсутність потреби в електричних лініях енергопостачання;
- захист чутливих елементів пристрою від зовнішнього впливу;
- збереження постійної геометрії оптичного каналу навіть за впливу несприятливих експлуатаційних чинників;
- ідентичне розташування основного та додаткового каналів щодо потоку контрольованої рідини;
- покращені показники чутливості та точності пристрою.

Застосування пропонованого віскозиметра в системах мащення суднових двигунів внутрішнього згоряння дозволить ефективно, надійно та безпечно оцінювати кількісні характеристики в'язкості мастильних матеріалів.

Крім того, волоконно-оптичний віскозиметр може бути інтегрований до інтелектуальні розподілені інформаційно-вимірювальні системи (ІРІВС) є сучасними комплексами, що поєднують різноманітні волоконно-оптичні вимірювальні пристрої та системи. Вони забезпечують можливість отримання достовірної інформації про стан контрольованих об'єктів і процесів у реальному часі. Основна перевага ІРІВС полягає в їх принциповій відмінності від раніше створених аналогів, де фізичні величини вимірювалися лише у визначених

точках і незалежно одна від одної за допомогою окремих приладів. У випадку з ІРІВС реалізується інтегрований підхід, який дозволяє одночасно аналізувати, порівнювати контрольовані фізичні величини, а також встановлювати закономірності їх взаємодії та просторово-часові розподіли [13 - 20].

Одночасно, технічне вдосконалення та автоматизація суден призводуть до суттєвого зниження випадків аварійності. Зростання рівня автоматизації суден, комп'ютеризація процесів управління суттєво вплине на зміни умов трудової діяльності людини взагалі, та вимоги до суднового персоналу [21].

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бережний, К. Ю. Моделі та засоби побудови комп'ютерної системи визначення реологічних характеристик суднових технічних рідин. – автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / Національний університет "Одеська морська академія". – Одеса, 2018. – 35 с.

2. Никольский, В. В., Сандлер, А. К. Моделирование процессов в вискозиметре с пьезоэлектрическим приводом // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. – 2003. – № 1 (11). – С. 95 -100.

3. Никольский, В. В., Сандлер, А. К. Моделирование свойств тиксотропных жидкостей в среде ELECTRONICS WORKBENCH // Вестник СевГТУ. Автоматизация процессов и управление. – 2004. – Вып. 57. – Севастополь: СевГТУ. – С. 159 - 162.

4. Wilson, T. L. Viscosity and density values from excitation level response of piezoelectric-excited cantilever sensors // Sensors and Actuators A: Physical. 2007. – Vol. 138. – Issue 1. – pp. 44-51. DOI: https://doi.org/ 10.1016/ j.sna.2007.04.050

5. Hongbin Yu. Capacitive micromachined ultrasonic transducer (cmut) based micro viscosity sensor // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2016. – Vol. 227. – pp. 346-351. DOI: https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.12.061

6. Chan Jasmine. Photoacoustic Imaging with Capacitive Micromachined Ultrasound Transducers: Principles and Developments / J. Chan, Z. Zheng, K. Bell, M. Le, P. Reza, J. Yeow // Sensors. – 2019. – № 19(16). – pp. 3617. DOI: 3617. 10.3390/s19163617

7. Патент України № 119814. МПК G01N 11/10 (2006.01). Віскозиметр / В. В. Нікольський, К. Ю Бережний,. М. В. Нікольський; зая-

вник та володар патенту Національний університет "Одеська морська академія". – u2017 03735. – заявл. 8.04.2017; опубл. 10.10.2017, Бюл. № 19. – 3 с.

8. Патент України № 41993. МПК (2009) G01M 11/00. П`єзооптичний віскозиметр / А. К. Сандлер, О. А. Сандлер; заявники та володарі патенту Сандлер, А. К., Сандлер, О. А. – u200812868. – заявл. 04.11.2008; опубл. 25.06.2009, бюл. № 12. – 3 с.

9. 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.

10. Snyder, A., Love, D. Theory of optical waveguides. URL: https://epdf.tips/ optical-waveguide-theory.html.

11. Сандлер, А. К., Карпилов, А. Ю. Применение волоконно-оптических датчиков в системах автоматического диагностирования судовых газотурбинных установок. // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2019. – Т. 11. – №. 2. – Одесса: ОНАХТ. – С. 46 - 52.

12. Сандлер, А. К., Сандлер, А. А. Волоконно-оптический датчик давления для высокотемпературных систем топливоподготовки // Судовые энергетические установки. – 2009. – Вып. 23. – Одесса: ОНМА. – С. 17 - 22.

13. 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.

14. Сандлер, А. К., Цюпко, Ю. М., Каменєва, А. В. Схемотехнічне рішення датчика швидкості потоку // Автоматизация судовых технических средств. – 2016. – Вып. 22. – Одесса: НУ "ОМА". – С. 86 - 92.

15. Сандлер, А. К., Батинський, А. І. Волоконно-оптичний пристрій контролю рівня для високотемпературних систем паливопідготовки // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2020. – Т. 12. – №. 2. – Одеса: ОНАХТ. – С. 9 -13. DOI: https://doi.org/10.15673/atbp.v12i2.1802.

16. Sandler, A., Bondarenko, A., Romanovska, O. Potential opportunities for the use of alternative fuels in marine steam boilers // Moderniza-

tion of today's science: experience and trends: Collection of Scientific Papers «SCIENTIA» with Proceedings of the IX International Scientific and Theoretical Conference, November 28, 2025. Glasgow, Scotland, UK: International Center of Scientific Research. – 2025. – P. 358 – 364. DOI: https://doi.org/ 10.36074/scientia-28.11.2025.

17. Сандлер, А. К., Рябцов, О. В. Застосування спеціальних оптичних волокон для вдосконалення навігаційного обладнання // Automation of Technological and Business Processes. – 2025. – № 17 (4). – С. 11 - 17. DOI: 10.15673/atbp.v17i4.3271.

18. Бондаренко, А. В., Сандлер, А. К. Волоконно-оптичні засоби контролю параметрів альтернативних палив суднових енергетичних установок // ГРААЛЬ НАУКИ: міжнар. наук. журнал. – Вінниця: ГО "Європейська наукова платформа"; НУ "Інститут науково-технічної інтеграції та співпраці", 2024. – № 42. – С. 404 - 409. DOI: 10.36074/grail-of-science.02.08.2024.

19. Сандлер, А. К., Макарчук, Є. В. Схемотехнічне рішення високотемпературного датчику тиску // XI міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 23.11.2021 - 24.11.2021 р.: матеріали конференції. – Одеса: НУ "ОМА". – 2021. – С. 90 - 194. DOI: 10.31653/2706-7874.SEEEA-2021.11.1-238.

20. 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.

21. Кузьменко, К. М., Сандлер, А. К. Особливості формування трудових резервів в умовах автоматизації суден // Education and science of today: intersectoral issues and development of sciences: Collection of scientific papers "ΛΌГОΣ" with Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference, Cambridge, March 29, 2024. Cambridge-Vinnytsia: P.C. Publishing House & UKRLOGOS Group LLC. – 2024. – P. 79 - 82. DOI: 10.36074/logos-29.03.2024.01.