

Новошицький Антон Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: anton.novoshytskyu@nuos.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0002-3232-4718>.

Шумілов Олександр Павлович – кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: aleksandr.shumilov@nuos.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0002-1325-454X>.

Поліщук Віталій Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: vitalii.polishchuk@nuos.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-0320-4327>.

TECHNOLOGICAL FACTORS AND THEIR INFLUENCE ON THE DURABILITY OF FUEL SYSTEM COMPONENTS

S.Zh. Bodu, A.V. Novoshytskyi, O.P. Shumilov, V.A. Polishchuk

A systematic engineering-scientific analysis has been conducted of a complex set of technological factors that directly determine the durability, operational performance, and reliability of the components of diesel internal combustion engine fuel equipment. The primary focus is on the injector nozzle holes as critical zones operating under significant thermal, hydrodynamic, mechanical, and chemical loading conditions. An in-depth assessment of the influence of microgeometry, internal surface roughness, residual stresses, as well as the condition of the inlet and outlet edges of the holes on the development of degradation processes—specifically cavitation, erosion, coking, fatigue, and thermochemical destruction—is conducted. The research methodology is based on a comprehensive synthesis of current theoretical approaches, numerical modeling, experimental observations, and detailed analysis of actual equipment failures. The work compares the effectiveness of various finishing methods: traditional mechanical (drilling, grinding, lapping) and non-contact (electroerosion, electrochemical, anodic-mechanical). It is demonstrated that non-contact technologies ensure high dimensional accuracy, reduction of roughness (down to $Ra \leq 0.02 \mu\text{m}$), geometric stability, and minimization of surface damage. It is established that initial defects formed at early manufacturing stages are not eliminated by subsequent operations and significantly reduce the injector's reliability. Quantitative data on changes in hole diameter, fuel leakage coefficient, hydrodynamic stability, and fuel spray symmetry under real operating conditions are provided. Recommendations are formulated regarding the optimization of the technological processing route, material selection, microrelief control, and residual stress management. The proposed solutions can be implemented in serial production to increase service life, reduce failure frequency, and ensure long-term operational stability of diesel fuel equipment. The presented results have practical applied value for mechanical engineering, and the proposed approach can be adapted to other types of highly loaded components.

Keywords: injector; nozzle; orifice; cavitation; erosion; microgeometry; residual stress; roughness; degradation; durability.

УДК 621.4

DOI: 10.20998/0419-8719.2025.2.12

А.В. Савченко, П.Б. Кіценко

МЕТОДИ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПАЛИВА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ДИЗЕЛЬНИХ СИСТЕМ ЖИВЛЕННЯ

У статті проведено порівняльний аналіз сучасних лабораторних та бортових технологій контролю якості дизельного палива, що мають критичне значення для забезпечення стабільної роботи систем живлення типу Common Rail в умовах експлуатації. Актуальність дослідження зумовлена потребою підвищення надійності та екологічної безпеки дизельних двигунів на фоні зростаючих вимог до паливної економічності та адаптації до концепції Індустрії 5.0. Метою роботи є систематизація знань про існуючі методи оцінювання якості палива та обґрунтування перспектив використання бортових сенсорних систем як елементу превентивного обслуговування дизельних систем. Основними завданнями є: аналіз стандартних лабораторних методик визначення фізико-хімічних характеристик палива (цетанове число, густина, в'язкість, вміст сірки, FAME, води та ароматичних сполук), огляд існуючих технологій для інтеграції засобів діагностики безпосередньо на борту транспортного засобу, а також оцінка точності, надійності й доцільності таких технологій у практичному застосуванні. У роботі використано методи порівняльного аналізу літературних джерел, стандартів та патентної документації, а також методологію технічної експертизи конструкцій і принципів роботи сенсорних систем. Новизна підходу полягає у комплексному зіставленні можливостей традиційної лабораторної діагностики з результатами, які можуть надавати сучасні бортові сенсори на основі камертона, спектроскопії в ближній ІЧ-області, ультразвукових, MEMS- і діелектричних технологій. Результати дослідження свідчать, що більшість лабораторних методик забезпечують високу точність, але є ресурсозатратними, малопридатними до умов реального часу та не завжди інформативними для швидкого реагування систем керування двигуном. Водночас бортові сенсори продемонстрували здатність з достатньою достовірністю оцінювати ключові фізичні параметри пального — зокрема густину, в'язкість, діелектричну проникність і вміст FAME. Визначено, що найбільш перспективними є системи, що поєднують кілька сенсорних технологій із алгоритмами машинного навчання для побудови повного профілю палива. Встановлено, що саме такі гібридні

рішення дадуть змогу адаптувати параметри роботи двигуна під зміни якості палива в реальному часі, знижуючи ризик поломок і зменшуючи токсичність викидів з відпрацьованими газами. У висновках зазначено, що перехід до розширеного використання бортових засобів моніторингу є логічним етапом у розвитку систем живлення дизелів. Рекомендовано активне дослідження та впровадження багатопараметричних сенсорів, що дадуть змогу реалізувати стратегії адаптивного керування двигуном і запобігання пошкодженням паливної апаратури. Запропоновано низку технічних напрямів удосконалення сенсорних систем: підвищення температурної стабільності, самоочищення поверхонь, розширення спектрального діапазону ІЧ-аналізу. Отримані результати можуть мати довгострокове значення в контексті екологізації дизельного транспорту та формування надійних інтелектуальних систем контролю якості палива в енергетичній галузі.

Ключові слова: дизельне паливо; Common Rail; моніторинг якості палива; бортові сенсори; лабораторний аналіз; цетанове число; густина; в'язкість; діелектрична проникність; NIR-спектроскопія; камертонні сенсори; паливна система; діагностика двигуна.

Вступ

Сучасне дизельне двигунобудування стрімко розвивається в напрямі впровадження технологій, що забезпечують вищу ефективність використання палива, зниження шкідливих викидів та підвищення експлуатаційної надійності. Однією з ключових інновацій у цьому контексті є система впорскування палива Common Rail, яка забезпечує високоточне керування процесом згоряння. Це дає змогу досягати кращих показників паливної економічності, зменшення викидів оксидів азоту (NO_x), твердих частинок і вуглекислого газу (CO_2), що відповідає актуальним вимогам екологічного регулювання.

Незважаючи на очевидні переваги, ефективність і довговічність роботи системи Common Rail значною мірою залежать від стабільної якості дизельного палива. Наявність механічних домішок, вологи або відхилень у хімічному складі палива від нормативних стандартів призводить до передчасного зношування форсунок, насосів високого тиску та інших компонентів паливної системи. Це, у свою чергу, негативно впливає на експлуатаційні характеристики двигуна та може спричинити серйозні технічні відмови [1].

Тема контролю якості пального в умовах реального часу розглядається у ряді досліджень. Зокрема, в роботі [2] було акцентовано увагу на важливості застосування сенсорів якості пального у важких дизельних двигунах, однак питання інтеграції лабораторних методів з новітніми бортовими рішеннями, а також їх ефективності у забезпеченні довготривалої надійності систем впорскування потребує подальшого комплексного аналізу.

У даній статті виконано систематизований огляд лабораторних та бортових технологій діагностики якості дизельного палива з урахуванням технічних вимог до сучасних систем живлення. Основну увагу приділено фізико-хімічним параметрам, які мають критичний вплив на роботу паливної системи, а також можливостям їх оперативного визначення за допомогою новітніх сенсорних технологій. Метою дослідження є встановлення ефективних шляхів моніторингу якості пального як запобіжного

засобу для зниження навантаження на паливну апаратуру та подовження ресурсу двигуна.

Лабораторні технології для аналізу якості палива

Хімія нафти та викопного пального тісно пов'язана з великою кількістю можливих комбінацій і реакцій, що можуть утворюватися між різними компонентами [3]. Щоб контролювати та розрізняти ці складові, були розроблені спеціальні методи й дослідження для аналізу палива. Крім того, міжнародні законодавчі організації посилили увагу до складу пального та його властивостей, адже саме ці чинники безпосередньо впливають на рівень шкідливих викидів з відпрацьованими газами ДВЗ. Задля уніфікації вимог до якості палива було ухвалено низку стандартів, які регулюють його склад безпосередньо з нафтопереробних заводів. Такі норми можуть відрізнятися залежно від регіону, однак у межах однієї території вони уніфікують склад пального. Щоб мати чітке уявлення про властивості дизельного палива й посилити контроль за основними показниками, були визначені певні лабораторні методики, закріплені у стандартах. Кожна з них відповідає за визначення конкретних характеристик пального.

Далі наведено приклади лабораторних тестів, кожен з яких сконцентрований на окремій властивості палива. Це дає змогу проілюструвати складність питання створення швидких і зручних у впровадженні бортових технологій моніторингу якості пального.

Визначення цетанового числа

Цетан ($\text{C}_{16}\text{H}_{34}$) умовно отримує оцінку 100 одиниць за його високу схильність до швидкого самозаймання, що обумовлює більш плавну роботу двигуна. Ароматичний вуглеводень альфаметилнафталін ($\text{C}_{10}\text{H}_7\text{CH}_3$) має протилежні властивості, тому умовно оцінюється в 0 одиниць. Змішуючи ці два компоненти в різних пропорціях, отримують низку еталонних палив із різним ступенем схильності до самозаймання: що більше частка цетану, то вищий рівень схильності суміші до самозаймання.

Щоб визначити цетанове число досліджуваного палива, вимірюють температуру його самозаймання та співставляють із підготовленими сумішами цетану та альфаметилнафталіну. Практичні випробування проводять на одноциліндрових установках типу WAUKESHA CFR-F5U (ИТ9-3М), робота яких базується на стисканні палива до моменту самозаймання [3]. Спочатку двигун налаштовують на еталонний режим, а потім поступово переводять на досліджуване паливо із кутом випередження впорскування 13° до ВМТ (верхньої мертвої точки). За допомогою зміни ступеня стиснення досягається такий стан, коли пальне починає самозайматися точно у ВМТ. Після того визначають таку еталонну суміш із цетану та альфаметилнафталіну, що забезпечить точно такі характеристики самоспалахування, як і досліджуване паливо. Відсоток вмісту цетану в такій суміші і вказує цетанове число досліджуваного палива.

Визначення густини палива

Стандарт EN ISO 12185 регламентує вимірювання густини палива (у межах $600\text{--}1100\text{ кг/м}^3$) за допомогою коливної U-подібної трубки. Похибка вимірювання становить $\pm 0,1\text{ кг/м}^3$, проте у стандарті згадано, що в'язкість палива може впливати на кінцеві результати. Для калібрування системи застосовують дві рідини з відомою густиною, яка має охоплювати мінімальне й максимальне значення діапазону, в якому досліджують паливо. Остаточний результат записують з огляду на температуру вимірювання (найчастіше 15°C або 20°C), адже густина сильно залежить від температури [4].

Визначення в'язкості палива (динамічної та кінематичної)

Згідно зі стандартом SS – ISO 3104 кінематичну в'язкість визначають шляхом вимірювання часу, за який фіксований об'єм рідини протікає через відкалібровану капілярну трубку під дією сили тяжіння. Така методика підходить як для прозорих, так і для непрозорих нафтопродуктів. Після обчислення кінематичної в'язкості перемноженням цього значення на густину палива отримують динамічну в'язкість. Цей показник відображає пропорційність між дотичною напругою та локальною швидкістю зсуву рідини. Оскільки в'язкість залежить від температури, вимірювання проводять у термостатованій ванні за суворо контрольованої температури. Для проведення тесту зазвичай потрібні: власне вискозиметр, штатив для нього, ванна з підтриманням температури, термометр і пристрій для вимірювання часу [5].

Визначення ароматичних сполук

Для палива з температурними межами кипіння

$150\text{--}400^\circ\text{C}$ і вмістом метилових ефірів жирних кислот (FAME) до 5 % (V/V) показник ароматичності визначають методом вискоэффективної рідинної хроматографії з рефрактометричним детектором. У результаті виявляють фракції моно-, ди- й триароматичних вуглеводнів. На основі цих даних за допомогою математичних розрахунків визначають сумарний вміст поліароматичних вуглеводнів і загальний рівень ароматичних сполук. Стандарт застерігає, що значна кількість сполук на основі кисню, азоту чи сірки, а також алкенів може впливати на точність результатів. У складі обладнання є рідинний хроматограф, система впорскування зразків, фільтр, колонки з керованою температурою (можливо, піч або нагрівальний блок), рефрактометричний детектор, комп'ютерна система реєстрації результатів, а також мірні колби й аналітичні ваги [6].

Визначення вмісту метилових ефірів жирних кислот (FAME)

Для визначення відсотка FAME у дизельному паливі застосовують метод інфрачервоної спектроскопії (EN 14078). Залежно від вмісту FAME розрізняють два діапазони вимірювань: А ($0,05\text{--}3\%$ (V/V)) і В ($3\text{--}20\%$ (V/V)). Якщо суміш містить понад 20 % (V/V) FAME, паливо попередньо розбавляють, але тоді точність оцінки не гарантована стандартом. Основні елементи обладнання: ІЧ-спектрометр у діапазоні $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ із роздільною здатністю 4 см^{-1} та кювети (KBr, NaCl, CaF₂). Після початкового калібрування установки зразок палива розводять розчинником, який не містить FAME, і записують ІЧ-спектр поглинання. Характерна смуга поглинання для естерів спостерігається приблизно на рівні $1745 \pm 5\text{ см}^{-1}$. Спочатку концентрацію FAME виражають у грамах на літр, а потім перераховують у об'ємні відсотки [7].

Визначення вмісту води

Стандарт EN ISO 12937 застосовують для палив із температурою кипіння до 390°C (за винятком паливних олів і речовин, що містять кетони). Метод охоплює визначення води в інтервалі $0,003\text{--}0,100\%$ (m/m). Використовують титратор Карла Фішера (автоматичний кулонометричний), змішувач, шприци, ваги (з точністю $\pm 0,1\text{ мг}$), 100-мл мірні колби, герметичні ємності, сушильні шафи, холодильні ванни й термометри. Перед випробуванням зразок перемішують 30 с і візуально перевіряють на наявність води та механічних домішок. Якщо візуально домішок не виявлено, три проби беруть шприцом і вводять у титратор. Після завершення процесу титрування визначають надлишок йоду, що витратився на реакцію. Оскільки стехіометрично 1 моль йоду реагує з 1 моль води, можна легко розрахувати загальний вміст води в паливі [8].

Визначення вмісту сірки

Для виявлення загального вмісту сірки в діапазоні 5–500 мг/кг у гомогенних автомобільних паливах (зокрема й у сумішах із часткою FAME до 10 % (V/V)) стандарт EN ISO 20884 пропонує метод рентгенівської флуоресценції з дисперсією за довжиною хвилі (WDXRF). Зразок палива опромінюють рентгенівським пучком, а спектрометр WDXRF реєструє інтенсивність флуоресценції сірки (S K-L_{2,3}) або фонового випромінювання. Порівнявши ці виміри з калібрувальною кривою, побудованою в межах певного діапазону, можна визначити вміст сірки [9].

З наведених прикладів видно, що для кожної характеристичної властивості палива існує власний метод аналізу. Кожен із цих тестів сформовано так, аби забезпечити надійну відтворюваність і високу точність результатів, а також уможливити їх зіставлення з уніфікованими нормами. Водночас багато з описаних технологій потребують попередньої обробки зразків, застосування реагентів або складних лабораторних приладів. Не всі підходи можна з легкістю впровадити безпосередньо в транспортному засобі.

Тож серйозним викликом залишається розробка портативних методів (або єдиної комплексної технології), здатних швидко та точно визначати одразу кілька властивостей палива й передавати результати бортовим системам керування двигуном. Це дозволило б оперативно коригувати роботу двигуна під час змін складу палива та покращити екологічні й експлуатаційні показники.

Бортові технології аналізу якості палива

У сучасній транспортній галузі зростає потреба в оперативних методах контролю якості палива безпосередньо на борту транспортного засобу. Існують розробки, які здатні в реальному часі визначати фізико-хімічні властивості палива та забезпечувати зіставлення результатів із запланованими параметрами, а також передавати ці дані до блоку керування двигуном (ECU). Розглянуто найпоширеніші на сьогодні бортові технології, що дозволяють проводити якісний і відносно швидкий аналіз характеристик пального.

Технологія на основі камертонного сенсора

Перші згадки про камертон як інструмент для отримання стабільного звуку сягають 1711 року й пов'язані з ім'ям Джона Шора. Він виявив, що U-подібна металева вилка, вдарена об тверду поверхню, резонує на певній частоті, утворюючи чистий тон без суттєвих гармонік. Вже в XIX столітті Герман фон Гельмгольц винайшов метод безперервного збудження камертона за допомогою електромагнітного поля, помітивши, що частота резонансу дещо

змінюється залежно від середовища, у якому перебуває камертон. Ця ідея резонансних вібрацій у різних середовищах пізніше лягла в основу сенсорних технологій.[10] Сучасні дослідження показують, що коливання камертона у рідкому середовищі відрізняються від коливань у повітрі або вакуумі. Зі створенням монокристалічного кварцового камертона з'явилася можливість виготовити компактні сенсори, де металізовані грані камертона функціонують як п'єзоелектричні зони. В електричному колі такий камертон можна збудити змінною напругою, що змушує «вилки» камертона коливатися. Якщо камертон занурити в паливо, зміна його резонансних частот камертона буде визначатися в'язкістю (η), густиною (ρ) та діелектричною проникністю (ϵ) цього середовища. Зовнішній вигляд датчику, що оснований на принципі камертона, наведено на рис. 1.



Рис. 1. Датчик властивостей рідини (на принципі камертона)

В основі роботи сенсора лежить попереднє калібрування в повітрі (або у вакуумі). Після цього, коли камертон занурюють у рідину з відомими властивостями, алгоритм «налаштовує» внутрішні параметри та надалі інтерпретує зміни в коливаннях сенсора для визначення густини ρ , в'язкості η та діелектричної проникності ϵ досліджуваного палива [11].

До переваг камертонних сенсорів можна віднести компактні розміри, відсутність рухомих механізмів та здатність вимірювати кілька параметрів пального одночасно. Крім того, такі сенсори можна монтувати як безпосередньо у паливопроводі, так і в паливному баку. Недоліком таких сенсорів є те, що на робочій поверхні камертона можуть утворюватись відкладення, викривляючи результати. Також цей метод не дає змоги визначити цетанове число чи вміст ароматичних сполук, тобто він ефективний переважно для фізичних властивостей палива.

Технологія спектроскопії у ближній ІЧ-області (NIR)

Перші дослідження близької інфрачервоної (Near-Infrared, NIR) області сягають початку XIX століття (Вільям Гершель). Проте активне застосування в промисловості NIR-спектроскопія набула

лише з 1950-х років. Зі створенням волоконно-оптичних світловодів і спеціалізованих монохроматичних детекторів NIR-технології отримали поширення в медицині, агропромисловому комплексі та машинобудуванні [12].

Органічні молекули (C–H, O–H, N–H та ін.) мають спектральні «пики» поглинання, пов'язані з їхніми коливальними рівнями енергії. У середній (MIR) та дальній (FIR) ІЧ-областях спостерігаються фундаментальні коливання, тоді як у ближній (NIR) — обертони та комбінаційні коливання. Хоча інтенсивність цих піків нижча, ніж у фундаментальних, NIR-спектр тим не менш дає змогу отримати достатньо корисної інформації про склад та структуру палива.

Сутність (рис.2) методу полягає в тому, що через зразок палива пропускають світло з різними довжинами хвиль (у діапазоні 750–2500 нм), а далі реєструють, яку частку випромінювання було поглинуто. За різницею між випроміненим і поглиненим потоками будують NIR-спектр, «характерний» для певного виду пального. Аналітичне ПЗ (алгоритми на основі методів багатовимірної регресії, PCA/PLS-моделей) розпізнає цей спектральний «відбиток» і встановлює ключові параметри: вміст ароматичних сполук, біокомпонентів (FAME), в'язкість, густину тощо.

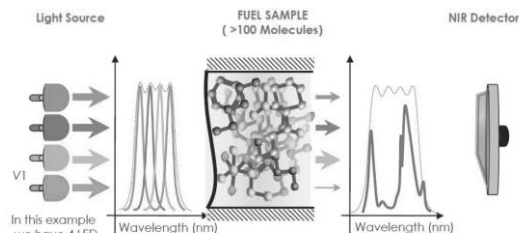


Рис. 2. Принцип роботи спектроскопії у ближній ІЧ області

Метод не потребує безпосереднього контакту з паливом, тобто є неінвазивним. Один спектрометр (за умови належного калібрування) може одночасно оцінювати кілька параметрів пального. Швидкість вимірювання становить секунди або менше. Технологія дає змогу контролювати не лише фізичні властивості, а й хімічний склад палива. Водночас складність полягає у формуванні масштабної бази еталонних зразків та математичних моделей, здатних точно інтерпретувати спектри поглинання. Є високі вимоги до стабільності джерела інфрачервоного випромінювання й детектора. Поглинання води та кисневмісних компонентів може заважати вимірам, тому потрібні коригувальні алгоритми. У разі ретельного калібрування NIR-сенсори здатні визначати не лише фізичні, а й хімічні властивості пального,

що особливо корисно для моніторингу вмісту FAME, ароматичних сполук і навіть нештатних домішок на кшталт бензину в дизелі.

Ультразвукова технологія

Ультразвукова технологія зазвичай використовується переважно в датчиках рівня рідини, але завдяки прогресу в розробленні передавачів і приймачів її починають застосовувати і для аналізу властивостей самих рідин.

Цей підхід базується на поширенні поздовжніх ультразвукових хвиль у діапазоні від 18 кГц до 1 ГГц. Характеристики поширення та відбиття цих хвиль в рідині обумовлюються властивостями рідини. Спеціальні алгоритми обробки даних про характеристики хвиль дають змогу розрізняти навіть схожі речовини. Більшість наявних ультразвукових сенсорів, здатних визначати характеристики рідин, розроблені насамперед для оливи та сечовини AdBlue (рис.3). Головна причина полягає в надзвичайній складності складу палива й різноманітності домішок, які воно може містити. AdBlue, на відміну від палива, має чіткіший і стабільніший склад, тому виявляти будь-які відхилення ультразвуковим методом набагато легше. Щодо оливи, то датчики рівня, що вже встановлені на окремих машинах, потенційно можна адаптувати для зчитування її фізичних і хімічних властивостей [13].

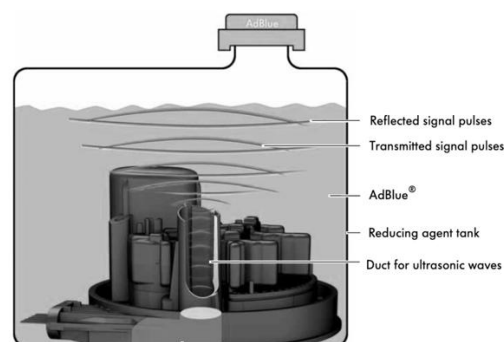


Рис. 3. Приклад застосування ультразвукового датчика для визначення рівня сечовини

Технологія мікроелектромеханічних систем (MEMS)

Вперше про це згадувалося 2010 року в дослідженні [14]. Сенсор, описаний там, має розміри лише приблизно 4...6 мм й містить порожнисту кремнієву трубку, запаяну в скло (анодне з'єднання) (рис. 4). Склояна пластина є основою для друкованої плати (PCB) і містить металеві електроди для передачі електричних сигналів.

Для вимірювання температури на платі передбачений тонкоплівковий металевий шар. Резонатор зібраний на рівні пластини, щоб зменшити вібрації

мікротрубки, а в нижній частині скляної пластини є два отвори, крізь які пальне проходить через мікротрубку. Він може одночасно вимірювати густину, в'язкість, температуру та витрату рідини. Завдяки цим показникам сенсор визначає концентрацію, чистоту, вміст води та тип пального, зокрема різноманітні нафтопродукти. В рамках дослідження підтверджено здатність датчика надійно розрізняти бензин, етанол, бутанол, дизель, біодизель, воду та повітря. Крім того, використовувалися суміші цих речовин. Результати показали, що вимірювання щільності з лінійною поправкою на температуру було достатнім для визначення всіх перерахованих видів палива [14]. Вимірювання в'язкості може бути корисним при використанні біодизельних сумішей. Крім того, в рамках досліджень було визначено, що такий датчик має низьку чутливість до вібрації та швидкості потоку. Насьогодні, таку технологію здебільшого застосовують у харчовій і медичній галузях.

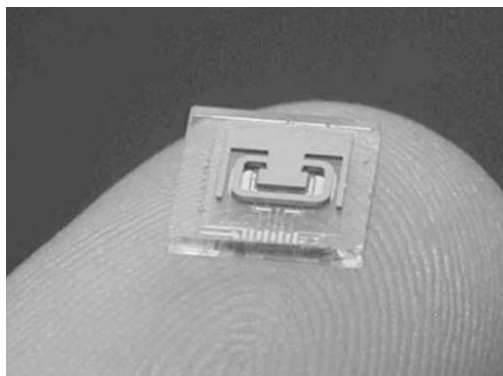


Рис. 4. Мікросенсор для визначення властивостей рідини

Сенсори на основі резонансної діелектричної камери

Автори дослідження [15] проводили експерименти з наявним у продажу сенсором, що використовує резонансну камеру для визначення діелектричних властивостей (рис. 5). Компанія Ford Motor застосовувала цей сенсор для вимірювання сумішей етанолу та бензину, тоді як автори дослідження [15] спробували оцінити за його допомогою властивості пального на нафтовій та біодизельній основі. Показання цього сенсора будуються на прямокутному коливанні (square wave) зі сталою частотою, специфічною для конкретного складу пального (приміром, для комерційного дизеля №1 вона становила 51,84 Гц, а для FAME — 58,96 Гц). Тривалість піків хвилі (peak length) пропорційна температурі палива. Дослідники виявили, що сенсор може розрізняти шість зразків різних дизельних палив і 12 видів біо-

дизелю з похибкою близько 10 % щодо вмісту біокомпонентів. Сенсор видавав вихідний сигнал у вигляді частоти (Гц), що відповідала резонансній вібрації чутливого елемента в середовищі палива. Експерименти підтвердили, що отримана резонансна частота пропорційна діелектричній проникності палива.

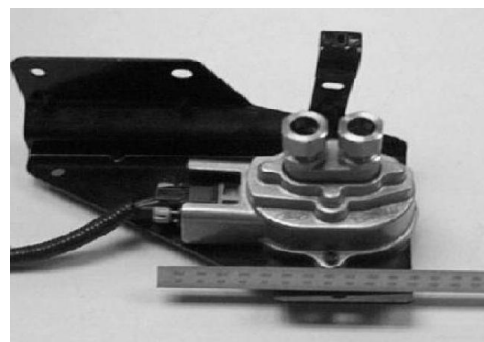


Рис. 5. Ford Motor Company резонансний діелектричний датчик

У цьому дослідженні перевірялися біодизелі з сої, канолі, тваринного жиру (tallow), «жовтих» і «коричневих» кулінарних відходів (yellow grease, brown grease), свинячого топленого жиру (lard), дизельне паливо №1 та дизельне паливо №2, а також їхні суміші з соєвим метиловим ефіром (SME). Додатково вивчався вплив температури, домішок метанолу і вмісту води. Сигнал сенсора варіювався від 58,5 до 60,23 Гц для біодизеля та від 51,84 до 52,62 Гц для нафтодизеля. Цей діапазон у 7,14 Гц виявився, на думку авторів дослідження [15], достатнім для визначення пропорцій дизель–біодизель із точністю до $\pm 10\%$ за об'ємом. Температура чинить лінійний зворотний вплив на вихідний сигнал сенсора: зі зростанням температури частота зменшується. Наявність метанолу та води дещо підвищує вихідний сигнал, проте цей вплив не заважає визначати склад палива на підставі сигналу такого датчика.

Таким чином, бортові (on-board) сенсори аналізу пального мають забезпечувати: швидкість та безперервність вимірювань, надійність і відмовостійкість, сумісність із різними видами палива, точність і стабільність результатів. Вказане вище дає змогу ефективного інтегрування даних про густину, в'язкість, вміст води, FAME, ароматичних сполук чи інші характеристик у стратегію керування двигуном. Камертонні датчики (tuning fork) добре підходять для визначення фізичних параметрів палива (густина, в'язкість, діелектрична проникність), тоді як за допомогою спектроскопії в ближній ІЧ-області

(NIR) можна, головним чином, отримувати відомості про хімічний склад палива. Проте, комплексні NIR-системи потребують ресурсоемної аналітичної обробки й ретельного калібрування. Щодо інших підходів — вони мають перспективи, але поки що їхнє промислове застосування ускладнене через дорожнечу чи технічні обмеження. Загалом можна відзначити тенденцію до розробки універсальних сенсорів, здатних поєднувати переваги одразу кількох технологій, аби вчасно й точно визначати тип і якість пального та покращувати роботу двигуна з огляду на економічність та викиди шкідливих речовин з відпрацьованими газами.

Висновки

Результати аналізу літературних джерел свідчать, що система Common Rail, має високий потенціал з огляду паливної економічності та зменшення викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами. Проте, для забезпечення належної роботи системи Common Rail надзвичайно важливим є забезпечення якості та заданого складу палива. Сучасні дослідження підтверджують важливість комплексного моніторингу дизельного палива — від контролю фізико-хімічних показників (густина, в'язкість, склад домішок) до визначення цетанового числа й вмісту FAME. Технологічні інновації в галузі бортових сенсорів (камертонні, NIR, резонансні діелектричні, ультразвукові тощо) дають змогу визначати властивості палива в реальному часі, що узгоджується з концепцією Індустрії 5.0 і посилює можливості автоматизованого контролю. При цьому найперспективнішими рішеннями є поєднання різних сенсорних підходів із потужними алгоритмами обробки даних, що дає змогу не лише діагностувати, а й адаптувати характеристики паливоподачі з метою комплексного поліпшення техніко-економічних показників дизеля. Дані від таких сенсорів також можуть бути використані для прогнозування потенційних проблеми в роботі паливної системи. Такий комплексний підхід сприятиме зниженню експлуатаційних витрат, продовженню терміну служби форсунок і насосів високого тиску, а також забезпечить кращу екологічність дизельних двигунів. Отже, подальше вдосконалення засобів моніторингу якості палива, а також інтегрування отриманих даних в алгоритми керування систем типу Common Rail, є актуальним і спрямовано на забезпечення техніко-економічних та екологічних показників дизелів, що відповідають усім сучасним вимогам.

Список літератури:

1. Jocanović M. T., Vuković G., Petrović M. et al. Diesel fuel filtration problems with modern common rail injection systems

// *Vojnotehnički glasnik / Military Technical Courier*. — 2017. — Т. 65. — № 4. — С. 968–993. 2. Saxena P., Pahuja R., Khurana M. S., Satija S. Real-Time Fuel Quality Monitoring System for Smart Vehicles // *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. — 2016. — Vol. 8, № 11. — P. 19–26. — DOI: 10.5815/ijisa.2016.11.03. 3. McCormick R., Ratcliff M., Yanowitz J. et al. Compendium of Experimental Cetane Numbers for Pure Hydrocarbon and Oxygenate Fuels / *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*. — 2017. — 89 p. — (NREL/TP-5400-67585). — DOI: 10.2172/67585. 4. Murphy F., McDonnell K., McNulty M. et al. The evaluation of viscosity and density of blends of Cyn-diesel pyrolysis fuel with conventional diesel fuel in relation to compliance with fuel specifications EN 590: 2009 // *Fuel*. — 2012. — Т. 91. — № 1. — С. 112–118. 5. Sparks D., Hernandez-Sanchez B., Gonzales R. et al. Dynamic and kinematic viscosity measurements with a resonating microtube // *Sensors and Actuators A: Physical*. — 2009. — Т. 149. — № 1. — С. 38–41. 6. Jennerwein M. K., Schonborn M. A., Schwaiger P. R. et al. Quantitative analysis of modern fuels derived from middle distillates — The impact of diverse compositions on standard methods evaluated by an offline hyphenation of HPLC-refractive index detection with GC×GC-TOFMS // *Fuel*. — 2017. — Т. 187. — С. 16–25. 7. Torres A., Marquez F., López J. et al. Analysis of the content of fatty acid methyl esters in biodiesel by Fourier-transform infrared spectroscopy: method and comparison with gas chromatography // *Journal of the American Oil Chemists' Society*. — 2020. — Т. 97. — № 6. — С. 651–661. 8. Scholz E. Karl Fischer titration: determination of water. — Springer Science & Business Media, 2012. — 184 p. 9. Kowalewska Z., Laskowska H. Comparison and critical evaluation of analytical performance of wavelength dispersive X-ray fluorescence and ultraviolet fluorescence for sulfur determination in modern automotive fuels, biofuels, and biocomponents // *Energy & Fuels*. — 2012. — Т. 26. — № 11. — С. 6843–6853. 10. Ng M., Jackler R. K. Early history of tuning-fork tests // *Otology & Neurotology*. — 1993. — Т. 14. — № 1. — С. 105. 11. Milpied J., Foulon M., Chevalier J. et al. Applications of tuning fork resonators for engine oil, fuel, biodiesel fuel and urea quality monitoring // *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*. — 2010. — Т. 2. — № 2. — С. 45–53. 12. Lunati A., Galtier O. Determination of mixture of methanol and ethanol blends in gasoline fuels using a miniaturized NIR flex fuel sensor. — *SAE Technical Paper*. — 2011. — № 2011-01-1988. — 6 p. 13. Dobrinski H., Paul D., Steiner T. et al. Combi-sensor for Oil Level and Oil Quality Management. — *SAE Technical Paper*. — 2008. — № 2008-01-0906. — 8 p. 14. Sparks D., Chiu W. K., Agrawal A. et al. Monitoring and blending biofuels using a microfluidic sensor // *Journal of ASTM International*. — 2010. — Т. 7. — № 8. — C. JAI102473. 15. Tat M. E., Van Gerpen J. H. Biodiesel blend detection using a fuel composition sensor // 2001 ASAE Annual Meeting. — American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1998. — С. 1–7.

Bibliography (transliterated):

1. Jocanović, M.T., Vuković, G., Petrović, M. et al. (2017), "Diesel fuel filtration problems with modern common rail injection systems", *Vojnotehnički glasnik / Military Technical Courier*, Vol. 65, No. 4, pp. 968–993. 2. Saxena, P., Pahuja, R., Khurana, M.S. and Satija, S. (2016), "Real Time Fuel Quality Monitoring System for Smart Vehicles", *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, Vol. 8, No. 11, pp. 19–26, DOI: 10.5815/ijisa.2016.11.03. 3. McCormick, R., Ratcliff, M., Yanowitz, J. et al. (2017), *Compendium of Experimental Cetane Numbers for Pure Hydrocarbon and Oxygenate Fuels*, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, 89 p., (NREL/TP-5400-67585), DOI: 10.2172/67585. 4. Murphy, F., McDonnell, K., McNulty, M. et al. (2012), "The evaluation of viscosity

and density of blends of Cyn-diesel pyrolysis fuel with conventional diesel fuel in relation to compliance with fuel specifications EN 590:2009", *Fuel*, Vol. 91, No. 1, pp. 112–118. 5. Sparks, D., Hernandez-Sanchez, B., Gonzales, R. et al. (2009), "Dynamic and kinematic viscosity measurements with a resonating microtube", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 149, No. 1, pp. 38–41. 6. Jennerwein, M.K., Schonborn, M.A., Schwaiger, P.R. et al. (2017), "Quantitative analysis of modern fuels derived from middle distillates – The impact of diverse compositions on standard methods evaluated by an offline hyphenation of HPLC-refractive index detection with GC×GC-TOFMS", *Fuel*, Vol. 187, pp. 16–25. 7. Torres, A., Marquez, F., López, J. et al. (2020), "Analysis of the content of fatty acid methyl esters in biodiesel by Fourier transform infrared spectroscopy: method and comparison with gas chromatography", *Journal of the American Oil Chemists' Society*, Vol. 97, No. 6, pp. 651–661. 8. Scholz, E. (2012), *Karl Fischer titration: determination of water*, Springer Science & Business Media, Berlin, 184 p. 9. Kowalewska, Z. and Laskowska, H. (2012), "Comparison and critical evaluation of analytical performance of wavelength dis-

persive X-ray fluorescence and ultraviolet fluorescence for sulfur determination in modern automotive fuels, biofuels, and biocomponents", *Energy & Fuels*, Vol. 26, No. 11, pp. 6843–6853. 10. Ng, M. and Jackler, R.K. (1993), "Early history of tuning-fork tests", *Otology & Neurotology*, Vol. 14, No. 1, p. 105. 11. Milpied, J., Foulon, M., Chevalier, J. et al. (2010), "Applications of tuning fork resonators for engine oil, fuel, biodiesel fuel and urea quality monitoring", *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, Vol. 2, No. 2, pp. 45–53. 12. Lunati, A. and Galtier, O. (2011), Determination of mixture of methanol and ethanol blends in gasoline fuels using a miniaturized NIR flex fuel sensor, *SAE Technical Paper*, No. 2011-01-1988, 6 p. 13. Dobrinski, H., Paul, D., Steiner, T. et al. (2008), *Combi-sensor for Oil Level and Oil Quality Management*, *SAE Technical Paper*, No. 2008-01-0906, 8 p. 14. Sparks, D., Chiu, W.K., Agrawal, A. et al. (2010), "Monitoring and blending biofuels using a microfluidic sensor", *Journal of ASTM International*, Vol. 7, No. 8, Article ID: JAI102473. 15. Tat, M.E. and Van Gerpen, J.H. (1998), "Biodiesel blend detection using a fuel composition sensor", *2001 ASAE Annual Meeting, American Society of Agricultural and Biological Engineers*, pp. 1–7.

Надійшла до редакції 26.06.2025 р.

Савченко Анатолій Вікторович – канд. техн. наук, старший викладач кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Savchenko.sci@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-0233-6072>.

Кіщенко Петро Борисович – аспірант кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Petro.Kitsenko@ieee.khpi.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0003-1580-612X>.

FUEL QUALITY ASSESSMENT METHODS FOR IMPROVING THE RELIABILITY OF DIESEL FUEL SYSTEMS

A.V. Savchenko, P.B. Kitsenko

The article presents a comparative analysis of modern laboratory and on-board technologies for monitoring the quality of diesel fuel, which are critically important for ensuring the stable operation of Common Rail fuel supply systems under operating conditions. The relevance of the research is due to the need to increase the reliability and environmental safety of diesel engines against the background of growing requirements for fuel efficiency and adaptation to the Industry 5.0 concept. The purpose of the work is to systematize knowledge about existing methods for assessing fuel quality and to justify the prospects of using on-board sensor systems as an element of preventive maintenance of diesel systems. The main tasks are: analysis of standard laboratory methods for measuring the physicochemical characteristics of fuel (cetane number, density, viscosity, sulfur content, FAME, water, and aromatic compounds), review of existing technologies for integrating diagnostic tools directly on board a vehicle, and evaluation of the accuracy, reliability, and practical applicability of such technologies. The study uses methods of comparative analysis of literature sources, standards, and patent documentation, as well as the methodology of technical evaluation of the design and operating principles of sensor systems. The novelty of the approach lies in the comprehensive comparison of the capabilities of traditional laboratory diagnostics with the results provided by modern on-board sensors based on tuning fork technology, near-infrared spectroscopy, ultrasonic, MEMS, and dielectric technologies. The research results show that most laboratory methods provide high accuracy, but are resource-intensive, poorly suited to real-time conditions, and not always informative for rapid response of engine control systems. At the same time, on-board sensors have demonstrated the ability to assess key physical parameters of fuel with sufficient reliability – particularly density, viscosity, dielectric constant, and FAME content. It was found that the most promising are systems that combine several sensor technologies with machine learning algorithms to create a complete fuel profile. It has been established that such hybrid solutions can adapt engine operation parameters to changes in fuel quality in real time, reducing the risk of malfunctions and lowering emission toxicity. The conclusions note that the transition to expanded use of on-board monitoring tools is a logical stage in the development of diesel injection systems. It is recommended to actively research and implement multiparameter sensors, which will make it possible to realize adaptive engine control strategies and prevent damage to fuel equipment. Several technical directions for improving sensor systems are proposed: improving thermal stability, self-cleaning surfaces, and expanding the spectral range of IR analysis. The results obtained may have long-term significance in the context of the environmental modernization of diesel transport and the development of reliable intelligent systems for monitoring fuel quality in the energy sector.

Key words: diesel fuel; Common Rail; fuel quality monitoring; on-board sensors; laboratory analysis; cetane number; density; viscosity; dielectric constant; NIR spectroscopy; tuning fork sensors; fuel system; engine diagnostics.