

можна зробити висновок, що при даному режимі роботи найбільш сприятливим є 10% зміст ДЕП у бензині.

Після проведення експериментальних досліджень впливу присадок на якості бензинів й експлуатаційні якості автомобілів доцільно провести економічну оцінку отриманих результатів, з метою визначення актуальності застосування запропонованих сумішей автомобільних бензинів з різними добавками й присадками. Тобто провести вартісну оцінку застосування чистих товарних бензинів і бензинів з додаванням добавок і присадок, які розглядалися в експериментальній частині.

Висновки

У роботі вирішені наступні науково-практичні задачі.

Виконано дослідження впливу добавки етанольної паливної на витрату палива та її вплив на викиди шкідливих речовин.

Література

1. ДСТУ 4277:2004 Норми і методи вимірювань вмісту оксиду вуглецю та вуглеводнів у відпрацьованих газах автомобілів з двигунами, що працюють на бензині або газовому паливі
2. Моторні палива: властивості та якість : підручник / Сергій Бойченко та ін. Київ: «Центр учбової літератури», 2017. 324 с.
3. Набивач В. М. и др. Якість автобензинів та екологічна безпека / В. М. Набивач, В. О. Герасименко. Довкілля та здоров'я. – 2002. - № 2. – С.26 – 28.

УДК 621.43:62-192

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ

Борак Костянтин Вікторович, докт. техн. наук, професор, Житомирський агротехнічний фаховий коледж,

e-mail: koss1983@meta.ua, ORCID: 0000-0002-5611-4707

Мовчан Костянтин Валерійович, здобувач освіти ОС «Магістр», Поліський національний університет, м. Житомир

Заруцький Сергій Олександрович, здобувач освіти ОС «Магістр», Поліський національний університет, м. Житомир

Боровський Іван Володимирович, здобувач освіти ОС «Магістр», Поліський національний університет, м. Житомир

Надійність дизельних двигунів вантажних автомобілів, що працюють у сфері сільського господарства, є критичною характеристикою, від якої залежить безперервність агротехнологічних процесів і економічна ефективність підприємств. Прості техніки через відмови двигунів можуть призвести до порушення строків польових робіт та значних втрат урожаю. Дизельні двигуни

традиційно відомі своєю міцністю та довговічністю, проте сучасні вимоги – зокрема, суворі екологічні стандарти, підвищені навантаження й перехід на біопалива – вимагають нових підходів до підвищення їхньої надійності. За останні 10 років двигунобудування зазнало істотних змін: впроваджено електронні системи управління і діагностики, нові матеріали та покриття для деталей, удосконалено технології виробництва. Це зумовлює потребу в узагальненні світового досвіду (Німеччина, США, Китай, Україна тощо) щодо успішних технічних рішень, впливу екостандартів, цифрових систем моніторингу і нових сервісних підходів, спрямованих на забезпечення безвідмовної роботи двигунів у важких умовах сільського господарства.

Під надійністю двигуна розуміють його здатність працювати безвідмовно у заданих режимах протягом нормативного ресурсу. Якість і надійність дизельного двигуна визначається сукупністю показників: безвідмовною роботою основних вузлів, довговічністю (ресурсом до капремонту), паливною економічністю та екологічністю [1]. Аналіз джерел показує, що понад половина відмов сучасних дизелів пов'язана з паливною системою, зокрема внаслідок використання пального недостатньої якості [1]. Наприклад, дослідження українських учених встановило, що експлуатація двигуна на біодизелі замість традиційного пального знижує імовірність безвідмовної роботи на ~10,6% через хімічний вплив біопального (метилових ефірів) на матеріали паливної та мастильної систем. Цей факт підкреслює, що впровадження екологічних видів палива повинно супроводжуватися адаптацією матеріалів і конструкції двигуна задля збереження його надійності.

Останніми роками виробники приділяють значну увагу оптимізації конструкції двигунів для рівномірного розподілу навантажень і зниження напружень у деталях. Широко застосовується комп'ютерне моделювання міцності (метод кінцевих елементів) з метою оптимізації форми блоків, рами, головок циліндрів тощо. Це дозволяє спростити конструкцію, зменшити масу вузлів і підвищити їхню механічну міцність, таким чином покращуючи надійність силових агрегатів. Зниження вібрацій і ударних навантажень досягається застосуванням балансувальних валів, демпферів крутильних коливань і міцніших кріплень. Іншим напрямом є вдосконалення систем охолодження та мащення: впровадження електронно керованих pomp, термостатів та форсунок охолодження поршнів забезпечує стабільний тепловий режим і запобігає перегріву, що продовжує ресурс двигуна.

Матеріалознавчі інновації зробили значний внесок у підвищення довговічності дизелів. Сучасні двигуни все ширше використовують легкі та міцні сплави, композиційні матеріали, керамічні покриття. Наприклад, частка двигунів із блоками циліндрів з алюмінієвих сплавів у західних країнах досягла ~50%, а головок циліндрів – 75% [1], що зменшило вагу і теплове навантаження. Японські виробники запровадили головки блоків з алюмінієво-титанових сплавів [1], а в США експериментували з тонкостінними блоками із низьковуглецевої сталі (товщиною 2–3 мм), отриманими методом штампування – така технологія дала змогу здешевити виробництво та знизити масу без втрати міцності. Перспективним матеріалом є компактний графітний чавун

(CGI – Compacted Graphite Iron), що за рахунок особливої вермикулярної структури графіту має вищу міцність на розрив більш ніж на 75% і твердість на 45% більшу порівняно зі звичайним сірим чавуном, водночас меншу густину. CGI вже застосовується в двигунах, яким потрібна підвищена міцність при високому тиску в циліндрах (наприклад, у нових високоефективних дизелях). Окрім базових матеріалів, широко використовуються зміцнювальні покриття: зносостійкі напилення на основі кераміки на робочих поверхнях (наприклад, на кільцях поршнів) та жаротривкі сплави для випускних клапанів і сідел підвищують ресурс цих деталей. Нанесення алмазоподібного вуглецю (DLC) на елементи паливної апаратури стало ефективним способом боротьби зі зносом: твердість DLC-покриття у 5 разів перевищує твердість загартованої сталі, а коефіцієнт тертя удвічі менший. Зокрема, впровадження DLC-покриття на голках форсунок і деталях насоса високого тиску значно зменшило їх спрацювання та підвищило толерантність до паливних домішок. У результаті ресурси паливної системи та двигуна в цілому зросли, хоча повністю проблему зносу не вирішено (основний шток форсунки все ще залишається вразливим елементом). Дослідники також експериментують із композитними деталями: у ФРН ще в 1990-х почали випробування шатунів, армованих бороновими волокнами, – такі шатуни витримали ~10 млн циклів навантаження без пошкоджень і виявилися на 54% легшими за сталеві. Легкі деталі з композицій (включно з частково «пластиковими» блоками циліндрів) дозволяють знизити масу двигуна більш ніж удвічі і зменшити навантаження на вузли тертя. Отже, впровадження нових матеріалів – один із ключових трендів підвищення надійності: вони забезпечують потрібний запас міцності та зменшують зношування навіть за підвищених навантажень.

Технологічні новації у дизельних двигунах останнього десятиліття спрямовані на підвищення ефективності згоряння палива і водночас дотримання екологічних норм (Euro V/VI, Tier 4 Final, China VI тощо) без втрати ресурсу. Одним із головних досягнень стало впровадження системи Common Rail з електронним управлінням упорскуванням. Високий тиск палива (до 2000–2500 бар і більше) та гнучке керування фазами і тривалістю впорскування забезпечують повніше згоряння і рівномірний тиск в циліндрі, що зменшує термічне навантаження на деталі та запобігає локальним перегрівам [1]. Окрім того, електронні блоки керування (ECU) реалізують функції самодіагностики і захисту двигуна: при виникненні небезпечних режимів (перегрів, падіння тиску оливи, детонація) система автоматично знижує потужність або подає сигнал оператору, що запобігає серйозним поломкам. Турбонаддув зі змінною геометрією дозволяє підтримувати оптимальний тиск наддуву в широкому діапазоні обертів, покращуючи прийомистість двигуна і знижуючи утворення сажі; вдосконалені турбокомпресори мають підвищену надійність завдяки використанню жаротривких матеріалів у крильчатках і підшипниках [2].

Виконання жорстких екостандартів супроводжувалося впровадженням систем рециркуляції відпрацьованих газів (EGR) та доочистки вихлопу (сажові фільтри DPF, каталітичні нейтралізатори SCR). Ці системи спершу ускладнили

конструкцію і навіть спричинили зростання кількості відмов. Зокрема, за перших років після введення норм ЕРА 2010 у США дослідження зафіксували «сплеск» проблем: у середньому 74 проблеми на 100 нових вантажівок, що на 60% більше, ніж у попереднього модельного ряду – це напряму пов'язано з недоопрацьованими компонентами систем контролю викидів. Проте виробники швидко врахували цей досвід: було підвищено надійність DPF (впроваджені покриття, що спрощують регенерацію фільтра сажі, датчики диференційного тиску для контролю стану фільтра), вдосконалено клапани EGR (застосовані матеріали, стійкіші до корозії та нагару), а системи впорскування сечовини (AdBlue) отримали резервні датчики і алгоритми, що запобігають помилкам дозування. У результаті сучасні дизельні вантажівки стандарту Euro VI/EPA Tier 4 зрівнялися з попередниками за рівнем безвідмовності, попри більшу складність. Ба більше, екологічні вимоги стимулювали появу якісно нових технологій: наприклад, у Китаї у 2020-х рр. досягнуто рекордного ККД 50–53% в експериментальних двигунах (Weichai), що стало можливим завдяки підвищенню тиску впорскування і ступеня стиску, але потребувало надмірних матеріалів і точної подачі пального. Вирішення проблем надмірних навантажень при цьому забезпечується за рахунок сумісного застосування кількох підходів – міцніших конструкцій, ефективнішого охолодження, якісного мастила та інтелектуального керування роботою двигуна в реальному часі [2].

Цифровізація стала невід'ємною складовою сучасних надійних двигунів. У літературі описані численні системи Condition Monitoring (моніторинг стану) та Predictive Maintenance (прогнозування технічного обслуговування) для дизельних установок [2]. Принцип їх роботи полягає в безперервному зборі параметрів роботи двигуна за допомогою датчиків (тиск і температура в системах, вібрації, витрати палива, коди діагностики тощо) та передачі цих даних через телематику на аналітичний центр. Спеціальні алгоритми аналізують тенденції і відхилення параметрів, завдяки чому можна завчасно виявити ознаки зносу чи несправності – наприклад, погіршення вироблення форсунок, забруднення фільтра або незвичні шуми в підшипниках. Якщо виявлено критичне відхилення, система надсилає оператору або механіку попередження із вказівками щодо можливих причин і дій. Такий підхід суттєво підвищує ефективність технічного обслуговування: ремонти плануються за станом, імовірність раптових відмов знижується, а ресурс деталей використовується повністю. За даними компанії Cummins, їхня хмарна система Remote Diagnostics одночасно відстежує понад 400 параметрів роботи кожного двигуна і формує insights (діагностичні інсайти) для сотень вантажівок у режимі 24/7. При цьому клієнту надсилаються лише «фільтровані» попередження про ті кілька відсотків машин, де справді потрібне втручання, тоді як інші вважаються справними

Окрім моніторингу, цифрові технології забезпечують адаптивне керування двигуном для компенсації зношування. Зокрема, дослідники в КНР розробили алгоритми самоналаштування карти впорскування пального при поступовому зносі розпилювачів форсунок: контролер відслідковує зміну

дозувань та тиску, «навчається» на цих даних і коригує тривалість уприску для кожного циклу. Це дозволяє підтримувати оптимальні характеристики згоряння і потужність навіть після часткового спрацювання паливної апаратури, а також запобігає аварійним режимам при критичному зносі (система переходить у режим захисту). Такий «штучний інтелект» у керуванні двигуном фактично продовжує йому життя, реалізуючи принцип self-diagnostics and adjustment (самодіагностики та підлаштування). У сукупності цифрові системи – від простих бортових діагностик OBD до складних хмарних платформ – зараз розглядаються як потужний інструмент забезпечення надійності дизельних двигунів за рахунок раннього виявлення проблем і оптимізації режимів роботи в реальному часі [3].

Усі виявлені заходи підвищення надійності згруповано у чотири категорії: (1) конструктивно-інженерні рішення (оптимізація конструкції, зниження вібрацій і теплових навантажень, резервування систем тощо); (2) матеріалознавчі та технологічні рішення (нові матеріали, покриття, вдосконалені процеси виробництва деталей); (3) системи, обумовлені екологічними стандартами (паливна апаратура, наддув, системи EGR/DPF/SCR і їхній вплив на надійність); (4) цифрові й сервісні підходи (моніторинг стану, прогнозування відмов, алгоритми адаптації і стратегія технічного обслуговування). Для кожної категорії узагальнено успішні приклади впровадження у різних країнах. Табл. 1 наводить стислий порівняльний огляд акцентів у покращенні надійності дизелів у згаданих країнах за останнє десятиліття.

Таблиця 1 – Приклади вирішення питання з підвищення надійності дизельних двигунів у різних країнах (2015–2025 рр.).

№ п/п	Країна/регіон	Ключові заходи для надійності двигунів
1.	Німеччина (ЄС)	Впровадження новітніх матеріалів: випробування композитних шатунів (на 54% легші, витримують 10 млн циклів без руйнування); головки блоків з алюмінієвих сплавів, блоки з CGI-чавуну. Високоточне двигунобудування: оптимізація конструкції під високий тиск впорскування, ефективне охолодження кожного циліндра. Дотримання Euro VI: покращена надійність систем SCR і DPF (каталітичні покриття, бортова діагностика для очистки фільтрів), що дозволяє відповідати нормам без частих відмов.
2.	США	Розробка потужних двигунів з акцентом на довговічність: програми типу SuperTruck підвищують ефективність і ресурс одночасно. Широке застосування телематики: дистанційний моніторинг кожного двигуна (Cummins Connected Solutions контролює 400+ параметрів) для превентивного обслуговування. Застосування CGI та зміцнених деталей у великолітражних дизелях (наприклад, компактно-graphite чавун у блоках Power Stroke, загартовані клапани та сідла) для витримування високих навантажень. Продумані сервісні стратегії: подовжені інтервали заміни оливи завдяки синтетичним мастилам та датчикам якості оливи, навчання механіків сучасним методам діагностики.

3.	Китай	<p>Стрімке впровадження інновацій: досягнення ККД >50% у дизелях Weichai при забезпеченні надійності через нові матеріали і технології згорання.</p> <p>Зниження тертя та зносу: державні програми розвитку технологій надійності тертьових пар (спільно компанії і університети, 2023 р.), у т.ч. нові сплави для кілець, антифрикційні покриття.</p> <p>Електронізація: до 2025 р. більшість комерційних дизелів обладнано електронним впорскуванням і бортовим комп'ютером; адаптивні алгоритми компенсують знос форсунок (автокорекція паливної карти).</p> <p>Імплементация стандарту China VI: локальні виробники успішно локалізували технології DPF/SCR, підвищивши їхню витривалість в умовах китайського палива (низької якості) – наприклад, додано нагрівачі для ефективної регенерації фільтрів при низьких температурах.</p>
4.	Україна	<p>Підтримання працездатності старіючого парку: модернізація радянських дизелів (типу ЯМЗ, Д-240) шляхом встановлення імпорتنих паливних апаратів (Common Rail) та турбонаддуву для зменшення навантажень і підвищення ресурсу.</p> <p>Адаптація до біопалив: проведені дослідження впливу біодизеля на знос (показали 10% падіння ресурсу без спеціальних заходів); на цій основі вносяться зміни у матеріали (замінено гумові ущільнення на стійкі до метанолу, додано фільтри-сепаратори води).</p> <p>Цифрові технології в агротехніці: сучасні імпорتنі трактори і комбайни оснащуються телеметрією, українські агрохолдинги почали впроваджувати системи моніторингу техніки (контроль мотогодин, температур) для прогнозування відмов.</p> <p>Співпраця з міжнародними виробниками: локальні сервісні центри отримують доступ до діагностичних систем, що дозволяє виявляти приховані проблеми двигунів ще до серйозної поломки.</p>

Як видно з табл. 1, спільною тенденцією є комплексний підхід: поєднання покращених матеріалів, точного інженерного розрахунку та цифрового контролю. Проте кожна країна робить акцент на своїх пріоритетах: Німеччина – на матеріалах і якості виготовлення, США – на сервісі та великих ресурсах, Китай – на швидкому впровадженні передових технологій, Україна – на підтримці працездатності техніки в суворих умовах та інтеграції світових напрацювань.

Аналіз показав, що одним із базових напрямів підвищення надійності є вдосконалення конструкції дизельних двигунів. Поліпшення конструктивних рішень спрямоване на зменшення навантаження на вузли та уникнення концентраторів напружень. Так, перехід до модульної побудови двигуна (окремі головки на кожен циліндр, секційні блоки) дозволяє спростити ремонт та заміну несправних модулів, зменшуючи тривалість простоїв. Використання більшої кількості опорних підшипників колінчастого вала в довгих двигунах знижує його прогин і вібрації, що важливо для ресурсності корінних підшипників. На прикладі суднових дизелів було відзначено, що завдяки впровадженню оптимізованих конструкцій та матеріалів середній ресурс до першого капітального ремонту значно зріс (інтервали між підйомами поршнів збільшили з ~6000 до 12000 і навіть 20000 годин). Хоча ці дані отримано для

морських двигунів, аналогічні тенденції спостерігаються і в автотракторних дизелях – міцніші деталі і краща рівномірність навантажень напругу подовжують моторесурс. Крім того, сучасне проектування широко застосовує принцип «відмовобезпечності»: критичні системи дублюються чи резервуються. Наприклад, два паливних насоси високого тиску, встановлені паралельно, або дубльовані сенсори тиску і температури – при відмові одного елемента інший дозволяє двигуну працювати до ремонту. Важливою інженерною зміною стало також впровадження центральної форсунки у камері згоряння і оптимізована форма камери згоряння, що забезпечує рівномірне згорання і менше термічне навантаження на поршень і клапани.

Результати огляду підтверджують, що матеріалознавчі інновації кардинально вплинули на живучість двигунів. У вантажних дизелях, що працюють з високим тиском у циліндрі, традиційний сірий чавун поступово замінюється на вермикулярний (CGI) або ковалентно-міцний чавун, який витримує більші навантаження без утворення тріщин. Це особливо актуально для двигунів, що відповідають нормам Euro VI/Stage V, де тиск впорскування і піковий тиск згоряння значно вищі. Використання алюмінієвих сплавів (з відповідним зміцненням) для виготовлення блоків і головок дозволило поліпшити тепловіддачу і уникнути локальних перегрівів, що колись були причиною короблення голівок на важких двигунах. Однак алюміній не міг забезпечити достатню міцність при дуже високих навантаженнях, тому знаходять застосування комбіновані рішення – наприклад, біметалеві компоненти (сталеві вставки в алюмінієвих головках), або вставки з високоміцного чавуну в критичних місцях блоку. Успіх використання композиційних матеріалів (вуглепластиків) на практиці поки обмежений експериментами в спорткаробудуванні та авіації, проте навіть часткове заміщення сталевих деталей композитами (наприклад, карбонові кришки клапанів, впускні колектори) знижує масу і навантаження на кріплення. Особливо перспективним вважається зниження тертя у парах ковзання шляхом нових покриттів: так, оксидно-керамічні покриття на гільзах і кільцях дозволили зменшити знос і чутливість до якості мастила. Алмазоподібне вуглецеве покриття DLC вже стало стандартом для плунжерів насосів і голок форсунок: воно не лише подовжує термін їх служби, а й робить менш критичним потрапляння твердих часток чи сірки з пального. Як зазначають фахівці, DLC-покриття приблизно вдвічі знижує чутливість апаратури до забрудненого дизельного палива, що актуально для сільського господарства, де заправки часто проводяться з польових резервуарів. Таким чином, у матеріалознавчому аспекті головні напрямки – це перехід на більш міцні сплави (CGI, леговані сталі), застосування легких матеріалів там, де це безпечно (Al, Mg, композити), а також масове впровадження зносостійких і антифрикційних покриттів. Синергетичний ефект цих заходів – суттєве подовження ресурсів ключових деталей (група «циліндр–поршень–кільця», паливна система, клапанний механізм), що підтверджується зростанням міжремонтних пробігів сучасних двигунів.

Проведений аналіз демонструє, що жорсткі екологічні нормативи хоча й ускладнили конструкцію двигунів, проте стали каталізатором технологічних нововведень, які при правильній реалізації не лише не шкодять надійності, а й покращують її. Так, система нейтралізації SCR спочатку викликала занепокоєння через потребу дозправки реагенту (сечовини) і ризику відмов датчиків NOx. Однак теперішні SCR-блоки спроектовані з великим запасом по міцності: застосовуються сталі каталізаторні банки замість керамічних, кількість датчиків подвоєна (для перевірки один одного), а електронний блок вміє переходити в резервні режими при збої окремих компонентів. Фільтри сажі (DPF) отримали унікальні покриття, що знижують температуру згорання сажі, і вбудовані нагрівальні елементи для активної регенерації – це усуває проблему їх забивання та розтріскування, яка спостерігалась 10–15 років тому. Електронно керовані клапани EGR нового покоління виготовляються з жароміцних сталей і мають покриття, стійкі до кислотного конденсату, тому їх клініння трапляється значно рідше, ніж у попередників 2000-х рр. Крім того, виробники оптимізували процеси згорання для зменшення утворення сажі та NOx ще в циліндрі: технології рециркуляції відпрацьованих газів охоплюють керований EGR-охолоджувач, а програмне забезпечення ECU забезпечує багатофазне впорскування (попереднє, основне, дозгорання), завдяки чому згорання відбувається рівномірніше і «чистіше». Ці інновації дозволили виконати екостандарти, не поступившись довговічністю: згідно з галузевими опитуваннями, ресурс сучасних двигунів Euro VI (до першого капремонту) навіть дещо зріс проти двигунів 90-х років, незважаючи на складність систем (серед причин – точніший контроль згорання і менший знос, чистіше мастило завдяки фільтрації сажі тощо).

Ще одна технологічна тенденція – пристосування двигунів до роботи на альтернативних паливах (біодизель, гідроочищена рослинна олива HVO). Як було відзначено, біопаливо може негативно впливати на надійність без належних заходів. Тому інженери впроваджують у паливні системи сумісні з біопаливом ущільнювачі (фторкаучукові, тефлонові), спеціальні присадки-антиоксиданти до оливи, що нейтралізують агресивні сполуки, і частіше інтервали заміни оливи при використанні біопального. Цифрові датчики якості палива можуть автоматично сповіщати про вміст біокомпонентів і підлаштовувати програми упорскування та кути випередження запалювання під їх властивості. В перспективі впровадження штучного інтелекту в керування згоранням (Machine Learning алгоритми, що оптимізують процес у реальному часі) дозволить завжди отримувати максимально повне згорання без детонації, незважаючи на варіативність палива – це також сприятиме довговічності, адже зменшиться утворення нагару і розбавлення мастила паливом.

Результати огляду підтверджують вирішальну роль цифрових технологій у забезпеченні надійності. На відміну від традиційного реактивного підходу (ремонт після поломки), сучасний підхід – проактивний: збір даних та раннє виявлення тенденцій до несправностей. Успішні приклади впровадження телематики у вантажному транспорті (Cummins, Volvo, Scania) демонструють до 30% скорочення незапланованих простоїв завдяки системам дистанційної

діагностики. Аналіз великих даних з двигунів у масштабах цілих автопарків дозволяє виявляти слабкі місця конструкції і вдосконалювати наступні моделі (концепція feedback loop від експлуатації до конструкторів). Окрім того, цифрові двійники (digital twins) починають застосовуватися для дизельних двигунів: створюється віртуальна модель конкретного двигуна, яка в реальному часі отримує дані сенсорів і імітує стан двигуна – це дає змогу прогнозувати залишковий ресурс компонентів і оптимізувати графік їх заміни.

Сервісні підходи також еволюціонують. Якщо раніше було прийнято виконувати регламентні роботи через фіксовані інтервали (за мотогодинами або пробігом), то нині все більше уваги приділяється обслуговуванню за станом. Наприклад, в аграрних господарствах запроваджуються регулярні аналізи відпрацьованої оливи (FluidWatch) – лабораторне визначення вмісту металевих домішок дозволяє судити про знос підшипників чи циліндропоршневої групи і завчасно провести ремонт. Великі корпорації (John Deere, CNH) оснащують двигуни датчиками контролю якості оливи, фільтрами із сенсорами перепаду тиску, що сигналізують про забруднення, та іншими елементами, які допомагають точно визначити оптимальний момент обслуговування. Нові сервіси, як-от remote update, дозволяють дистанційно оновлювати прошивку ECU, усуваючи потенційні програмні помилки, що також може попередити збої.

Окремо варто відзначити людський фактор: підвищення кваліфікації обслуговчого персоналу і впровадження стандартів тренування операторів машин. Навіть найдосконаліша техніка може передчасно вийти з ладу при неправильній експлуатації. Тому у багатьох країнах (США, ЄС) фермери та механіки проходять навчання з основ діагностики двигунів, правил холодного пуску, прогрівання та охолодження турбованих моторів, використання рекомендованих мастильних матеріалів тощо. В Україні такі програми також починають з'являтися, особливо в рамках сервісу офіційних дилерів сільгосптехніки. Правильна експлуатація може збільшити реальну надійність двигуна не менше, ніж конструктивні зміни.

Об'єднуючи результати, можна стверджувати, що підвищення надійності дизельних двигунів є багатоаспектним завданням. Інженерні удосконалення забезпечують фундамент міцності та оптимальні режими роботи, нові матеріали і покриття зменшують зношування, технологічні інновації (паливні системи, наддув, екопристрої) тримають баланс між потужністю і довговічністю, а цифрові системи та грамотний сервіс гарантують, що двигун використовується і обслуговується найефективніше. Різні країни продемонстрували, що успішні стратегії можуть різнитися, але всі вони сходяться до спільної мети – безвідмовна, стабільна робота дизельного двигуна протягом максимально довгого терміну.

Висновки

Сучасні тенденції показують, що досягти істотного підвищення надійності дизельних двигунів можна лише поєднуючи кілька напрямків інновацій. Інженерні рішення (покращена конструкція, оптимізовані процеси

згоряння) закладають основу, матеріалознавчі досягнення (нові сплави, композити, покриття) забезпечують витривалість компонентів, а цифрові системи моніторингу та обслуговування дозволяють повністю реалізувати потенціал надійності на практиці. Такий мультидисциплінарний підхід вже продемонстрував ефективність у провідних світових виробників.

До найефективніших інженерно-технічних рішень для підвищення довговічності дизелів можна віднести: впровадження високого тиску впорскування із прецизійною паливною апаратурою (що покращує згоряння і зменшує знос), використання міцніших і легших матеріалів (CGI-чавун, алюмінієві сплави, керамічні та DLC-покриття) для ключових деталей, удосконалення систем наддуву та охолодження (зменшення теплових навантажень), а також модульні конструкції, що полегшують ремонт. Особливо відзначено позитивний вплив таких інновацій, як композитні деталі (наприклад, успішний досвід із композитними шатунами в Німеччині) та адаптивні алгоритми керування (китайські системи з компенсації зносу форсунок). Ці рішення дозволяють продовжити ресурс двигунів без компромісу з їх продуктивністю.

Сучасні екологічні нормативи стали викликом, який обернувся прогресом: після початкового зниження надійності через ускладнення конструкції (наприклад, проблеми з DPF/EGR у 2010-х роках) виробники оптимізували ці системи. Нині додаткові екокомпоненти майже не знижують готовність техніки до роботи – навпаки, вони сприяють кращому контролю згоряння та чистоті масла, що позитивно позначається на ресурсі. У майбутньому екостандарти Євро VII та наступні вимагатимуть ще більш досконалих систем, проте тренд однозначний: «чисті» дизелі можуть бути одночасно і надійними за умови застосування новітніх технологій. Одним із перспективних напрямків є широке використання відновлюваних та низьковуглецевих видів палива (біодизель, HVO, e-дизель). Щоб зберегти ресурс при роботі на них, конструктори будуть змушені поліпшувати матеріали (стійкі до хімічних впливів) і впроваджувати універсальні системи упорскування, здатні адаптуватися під різне паливо.

Огляд підтвердив вирішальне значення систем діагностики та моніторингу. Встановлено, що впровадження дистанційної телеметрії та аналізу стану двигуна дозволяє знизити аварійність і час простою техніки на 20–30%. Прогностичні алгоритми запобігають серйозним поломкам, переводячи обслуговування у планово-попереджувальну площину. Надалі, з розвитком інтернету речей та штучного інтелекту, даний напрямок лише посилиться: можливо, двигуни самі будуть замовляти необхідні запчастини чи просити сервісного інженера про огляд ще до появи видимих проблем. Таким чином, цифровізація є одним із найперспективніших шляхів підвищення надійності, особливо в поєднанні з іншими заходами.

Вивчення досвіду різних країн показало, що глобальні виробники активно діляться технологіями і найкращими практиками. Українському сектору сільгоспмашинобудування важливо враховувати ці тенденції: співпраця з зарубіжними компаніями, участь у міжнародних проєктах з тестування

матеріалів і компонентів, впровадження сучасних стандартів обслуговування – усе це сприятиме підвищенню надійності техніки на вітчизняних полях. Зокрема, результати українських досліджень з біопалив та якості пального можуть стати вагомим внеском у світову науку про надійність, адже проблеми паливної якості актуальні й для інших країн.

Література

1. Двигуни в сільському господарстві. АгроЕліта. URL: <https://surl.lu/golfum>.
2. Ahmed N., Shakoor N. Advancing agriculture through IoT, Big Data, and AI: A review of smart technologies enabling sustainability. Smart Agricultural Technology. Volume 10, March 2025, 100848. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100848>.
3. Ting Lao C., Akroyd J., Eaves N., Smith A., Morgan N. Investigation of the impact of the configuration of exhaust after-treatment system for diesel engines. Applied Energy. Volume 267, 1 June 2020, 114844. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114844>.

УДК 629.3.004

ІНЖИНИРІНГ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ І УПРАВЛІННЯ ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Волков Володимир Петрович, докт. техн. наук, професор, завідувач кафедрою інжинірингу систем автомобільного транспорту ім. М.Я.

Говоруценка, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: volf-949@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2202-3441

Волкова Тетяна Вікторівна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: wolf949@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8546-4119

Верхломчук Віталій Валерійович, аспірант, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: verhломchuk14@gmail.com, ORCID: 0009-0003-7725-5271

Левчук Максим Анатолійович, аспірант, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: Levchuk.max@gmail.com ORCID: 0009-0006-3736-7465

Шульга Руслан Володимирович, аспірант, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: rshulga7@gmail.com, ORCID: 0009-0001-5648-1478

Уколов Євгеній Олександрович, магістр, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: ukolovevgen1975@ukr.net, ORCID: 0009-0006-3091-5086

Інжиніринг за визначенням – набір способів та методів, які підприємство, фірма використовує для тактики і стратегії власної діяльності. Інжиніринг в