

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора Білоусова Євгена Вікторовича
на дисертаційну роботу Хрулева Олександра Едуардовича
«Метод експериментальної оцінки пошкоджень
двигунів внутрішнього згоряння транспортних засобів»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.05.03 – Двигуни та енергетичні установки

Дисертація присвячена розробці методу експериментальної оцінки та моделювання пошкоджень двигунів внутрішнього згоряння транспортних засобів при порушенні умов експлуатації та спрямована на розв'язання актуальної наукової проблеми, пов'язаної з недосконалістю наявних методів автотехнічної діагностики.

1. Актуальність теми дисертаційного дослідження

Тема дисертації є високо актуальною в контексті сучасних тенденцій автотранспортної галузі, де, незважаючи на розвиток електричних силових установок, двигуни внутрішнього згоряння, як і раніше, залишаються ключовим компонентом більшості транспортних засобів. В даний час число автомобілів у світі продовжує зростати і, за деякими даними, світовий парк вже перевищив 1,5 млрд одиниць, серед яких переважна більшість оснащена двигунами внутрішнього згоряння. За такого обсягу ринку значні витрати автовиробників та ремонтних підприємств на гарантійне обслуговування стають неминучою проблемою. І цей факт зумовлює зацікавленість автовиробників, транспортних та ремонтних підприємств у точній ідентифікації причин несправностей, оскільки це необхідно для підвищення надійності двигунів та скорочення гарантійних витрат.

З іншого боку, в умовах економічної нестабільності, спричиненої будь-якою глобальною причиною, від пандемій до економічних та військово-політичних криз, абсолютно неминуче зростання ринку автомобілів, як особистих, так і комерційних, як прямий наслідок уповільнення або навіть падіння доходів підприємств та приватних осіб. У такій ситуації перевірка технічного стану двигунів та правильне виявлення несправностей стають критично важливими операціями для оцінки їх залишкового ресурсу, а точне визначення причин несправностей скорочує час діагностики та витрати на ремонт, включаючи усунення пошкоджень у рамках гарантій.



У той же час, нерідко застосовувані в автотехнічних дослідженнях застарілі підходи, що ґрунтуються на порівняльному аналізі з еталонами та використанні формальної логіки, часто призводять до багатоваріантності інтерпретації причин ушкоджень, що знижує достовірність висновків про причину несправності. У такій ситуації виявляти критичні несправності (наприклад, у механічній частині двигунів) допомагає моделювання процесів ушкодження, що також підвищує безпеку експлуатації автомобілів. Однак за відсутності методик моделювання цілого ряду специфічних видів несправностей, таких як гідроудар, відмови систем змащення та охолодження, пошкоджень внаслідок абразивного зношування та ін., необхідність розробки нової методології не має альтернативи.

Це означає, що тема роботи, де експериментальні дослідження доповнені моделюванням досліджуваних процесів, не просто актуальна, а поєднує практичну значимість, економічні та екологічні вигоди для автопромисловості, транспортних і сервісних підприємств. При цьому робота також відповідає на сучасні тенденції, пов'язані з ускладненням автомобільних конструкцій та технологій, викликаючи необхідність дедалі більш точної діагностики ушкоджень та визначення причин несправностей. Крім того, дана робота вирішує також завдання підвищення якості автотехнічних досліджень, у тому числі судових експертиз несправностей, що робить її ще більш актуальною та затребуваною для науки та практики.

2. Загальна оцінка змісту дисертаційної роботи та її завершеності

Основний том дисертації складається із анотації, вступу, 6 розділів, висновків по кожному розділу, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків на 412 сторінках. Окремий том додатків включає в себе 7 розділів на 407 сторінках.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та завдання, визначено об'єкт та предмет дослідження, описано основні методи досліджень та зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Викладено основні положення наукової новизни та практичної цінності, апробації та публікації результатів дисертації. Далі у першому розділі розкрито характеристики об'єкта та предмета дослідження, наведено основні етапи розвитку наукової проблеми, у другому розділі представлено загальний підхід до методології пошуку причин несправності ДВЗ при порушенні умов експлуатації транспортних засобів, а у третьому розділі досліджуються

детерміновані моделі, які описують розвиток несправності ДВЗ і становлять загальне дерево відмов.

У четвертому розділі описаний метод розрахунку розподілу пилу в розгалужених каналах впускної системи двигуна, у п'ятому розділі досліджується процес стиснення повітря з рідиною та розглядається метод розрахунку характеру пошкодження шатуна в залежності від кількості рідини, що надійшла в циліндр при гідродарі. У шостому розділі розглянуто загальні питання обладнання та інструмента для досліджень технічного стану двигунів автомобілів з метою визначення причин несправностей.

Крім того, в окремому томі додатків дисертації крім актів впровадження наведено значний масив даних, які додатково розкривають технологію виконаних досліджень. Це, у тому числі методика експериментальних досліджень технічного стану двигунів автомобілів (додаток А), детальний опис обладнання та інструмента для дослідження причин несправності автомобільних двигунів (додаток Б), застосованої технології мікрометрирування, тобто контролю розмірів, форми, взаємного положення поверхонь і матеріалу деталей (додаток В) та деякі результати моделювання напружено-деформованого стану деталей на основі даних досліджень причин пошкоджень у двигунах (додаток Г). Крім того, наведено важливі матеріали про інформаційне забезпечення досліджень технічного стану та причин несправності двигуна автомобіля (додаток Д), а також зразки висновків виконаних досліджень технічного стану та причин несправності двигунів автомобілів (додаток Е).

Аналіз структури та змісту дисертації показує, що йдеться про серйозну роботу, в який не просто виконано значне за обсягом та закінчене комплексне дослідження, а представлено та докладно описано всі складові такого дослідження, від інструментів, обладнання, методик та результатів експериментів до математичних моделей несправностей та отриманих теоретичних результатів у порівнянні з даними експериментів.

Тема, зміст та результати дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.05.03 за формулою спеціальності та напрямками досліджень. Текст реферату повною мірою відображає зміст дисертації.

3. Наукова новизна роботи

Наукова новизна дисертації полягає у створенні оригінальної методології експериментальної оцінки пошкоджень ДВЗ, що інтегрує аналітичний підхід та

модельовання з експериментальними методами дослідження пошкоджень. Основні елементи новизни цієї роботи включають:

- Удосконалення логіко-імовірнісного методу оцінки причин пошкоджень ДВЗ (розділ 2), що дозволяє підвищити об'єктивність та точність діагностики за рахунок формалізації процесів аналізу.
- Розробка спеціалізованих методів оцінки причин несправностей у разі відмови систем змащення та охолодження, заснованих на математичному модельованні нестационарних процесів теплообміну (розділ 3).
- Створення методу оцінки пошкоджень деталей ДВЗ з урахуванням потрапляння та руху частинок пилу у впускному тракті, що використовує комп'ютерне модельовання тривимірної двофазної течії у програмі ANSYS (розділ 4.2).
- Розробка методу реконструкції руйнувань деталей ДВЗ у результаті гідроудару (розділ 5), що включає аналіз напружено-деформованого стану деталей та причинно-наслідкових зв'язків між їх пошкодженнями.
- Експериментальне обґрунтування запропонованих методів, виконане на базі досліджень технічного стану транспортних засобів (розділ 6), що підтверджує їх застосування в реальних умовах (додаток Е).
- Інтеграція методів аналізу та синтезу, чисельного розв'язання диференціальних рівнянь та логічного аналізу дерева відмов у єдину методологію, що мінімізує суб'єктивність та трудомісткість діагностики відмов.

До найвагоміших отриманих в роботі науково-практичних результатів, з точки зору опонента, слід віднести розробку термо-газодинамічної моделі гідроудару в циліндрі двигуна (розділ 5.1) з модельованням напружено-деформованого стану деталей у раніше маловивченій закритій області деформації (розділ 5.2) та моделі двофазної течії повітря з частинками пилу у впускному колекторі двигуна з аналізом перерозподілу частинок каналами (розділ 4.2).

Всі ці результати становлять значний внесок у теорію діагностики складних технічних систем шляхом усунення прогалин у існуючих підходах та алгоритмах пошуку причин пошкоджень та/або доповнення їх там, де методи традиційної діагностики ще не відпрацьовані, утруднені або незастосовні внаслідок відмови та непрацездатності двигуна.

4. Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій

Наукові положення дисертації включають розробку нової методології експериментальної оцінки пошкоджень ДВЗ, удосконалення логіко-імовірнісного методу та створення спеціалізованих методів діагностики відмов у системах змащення та охолодження, при термічних пошкодженнях, гідроударі та позаштатному абразивному впливі частинок пилу. Усі зазначені методи базуються на комплексному аналізі існуючих методів, використанні сучасних інструментів моделювання (стандартні програми типу ANSYS, Lotus Engine Simulation, чисельне інтегрування, аналіз дерева відмов) та експериментальної перевірки моделей та результатів моделювання на реальних транспортних засобах. Застосування математичного та комп'ютерного моделювання забезпечує високу точність розрахунків, а ретроспективний аналіз історії експлуатації транспортних засобів додатково підвищує об'єктивність результатів, оскільки допомагає встановити момент початкового пошкодження і поєднує теоретичний прогноз з реальною картиною несправності.

Висновки дисертації щодо ефективності запропонованих методів та їх переваг підкріплені системним підходом, який включає теоретичні дослідження з розробки моделей, власне моделювання та експериментальні дослідження процесів пошкодження для підтвердження теоретичних результатів. Експериментальна перевірка на базі досліджень технічного стану транспортних засобів підтверджує застосування запропонованих методів у реальних умовах роботи транспортних і ремонтних підприємств, а також достовірність висновків.

Рекомендації щодо впровадження розроблених методів у сервісних центрах, в освітні програми та в автотехнічну експертизу обґрунтовані практичною спрямованістю та потенціалом методів з точки зору підвищення надійності ДВЗ. Таким чином, результати, отримані в роботі, в сукупності вказують на обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій цієї роботи.

5. Достовірність дослідження

Достовірність результатів дисертації підтверджується використанням визнаних наукових методів, включаючи аналіз та синтез, математичне моделювання, чисельне інтегрування, комп'ютерне моделювання за допомогою відомих програмних комплексів ANSYS та Lotus Engine Simulation, а також експериментальну перевірку теоретичних результатів у реальних автотехнічних

дослідженнях несправностей. Так, застосування програми ANSYS для моделювання напружено-деформованого стану деталей (розділи 5.2, 5.3.2, додаток Г) та двофазної течії повітря з частинками пилю (розділ 4.2) свідчить про високий рівень технічного опрацювання запропонованих методів. Аналіз дерева відмов (розділи 2.3-2.6) та ретроспективний аналіз історії експлуатації транспортного засобу (додаток Д5.2) забезпечують об'єктивність висновків із прив'язкою подій в експлуатації до конкретних подій та ознак пошкоджень. У цьому експериментальна перевірка з урахуванням досліджень технічного стану транспортних засобів (розділи 2.2, 6.4, додаток Е) підкріплює застосовність розроблених методів на сегмент досліджуваних типів двигунів, поширюючи їх результати область відмов, недоступних для традиційних методів діагностики. У сукупності ці ознаки підтверджують об'єктивність та надійність отриманих результатів, а також відповідність використаних методів дослідження поставленим завданням.

6. Значимість для науки та практики

Теоретична значущість дисертації полягає у розробці нової методології експериментальної оцінки пошкоджень двигунів внутрішнього згоряння, яка поглиблює та доповнює теоретичні засади діагностики складних технічних систем. Удосконалення логіко-імовірнісного методу, створення спеціалізованих методів діагностики відмов систем змащування та охолодження, термічних пошкоджень, гідроудару та абразивного впливу частинок пилю, а також використання математичного та комп'ютерного моделювання (включаючи програмний комплекс ANSYS) збагачують наукові знання про процеси пошкодження ДВЗ. Інтеграція аналізу дерева відмов та ретроспективного аналізу історії експлуатації транспортного засобу у запропонований комплексний метод оцінки забезпечує формалізацію діагностичних процесів у галузі відмов та непрацездатності двигуна, усуваючи суб'єктивність традиційних підходів. У результаті є всі підстави стверджувати, що робота не тільки робить внесок у галузі двигунобудування та надійності двигунів та енергетичних установок, а й створює основу для подальших досліджень.

У той самий час практична значимість визначається можливістю застосування розроблених методів у автопромисловості, автотранспортних підприємствах і ремонтно-сервісних центрах, і навіть під час проведення автотехнічних експертиз. Розроблені методики оцінки причин несправностей дозволяють скоротити час діагностики, підвищити її точність та оптимізувати

ремонтні процеси, що знижує експлуатаційні витрати та підвищує надійність ДВЗ. Експериментальна перевірка методів на реальних транспортних засобах підтверджує їх практичну цінність, сприяючи поліпшенню екологічних характеристик та економічної ефективності експлуатації транспорту. Результати дослідження можуть бути застосовані в автомобільній промисловості та підприємствах автосервісу для контролю якості виробництва та ремонтних робіт з метою запобігання гарантійним дефектам, а також бути корисними в освітніх програмах для підготовки фахівців.

7. Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях

Матеріали дисертації достатньо повно викладені в 55 публікаціях (з них 25 зроблено самостійно здобувачем), в тому числі одна монографія, 24 статті (7 з них у виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus і ще 3 в закордонних виданнях), а також 30 тез конференцій та додаткових апробацій. Всі вимоги положень МОН України щодо наукових публікацій витримано.

8. Зауваження та пропозиції:

Разом з тим, при вивченні матеріалів дисертації слід відзначити деякі зауваження:

1. Щодо висновку по розділу 2, логіко-імовірнісний метод демонструє підвищення вірогідності правильної оцінки причини несправності, але неясно, як він співвідноситься із зарубіжними ймовірнісними підходами, наприклад, що використовуються в системах OBD-II (On-Board Diagnostics).

2. У розділі 2 обмежену увагу приділено автоматизації діагностики з пошуку причин несправностей. Розроблено логічні алгоритми пошуку причин несправності, але не розглядається можливість інтеграції розроблених методів із сучасними системами штучного інтелекту або автоматизованими діагностичними комплексами, що могло б підвищити їхню практичну цінність в умовах цифровізації автотехнічної галузі.

3. Щодо розділу 3, при аналізі пошкоджень підшипників колінчастого валу (розділ 3.5) вказані залежності тиску оливи від частоти обертання та часу від моменту відмови подачі оливи, але не обговорюється, як особливості конструкції та матеріалу підшипника впливає на зношування та пошкодження при настанні критичних режимів. Дане питання важливе в контексті практичного застосування запропонованого методу, оскільки матеріал значно впливає на пошкоджуваність підшипника.

4. Моделювання процесів, наприклад, відмов турбокомпресорів (розділ 2.5), перегріву (розділ 3.3) та систем газорозподілу (розділ 4.3) не враховує повною мірою такі конструктивні особливості двигунів, як матеріали деталей (наприклад, алюмінієві чи чавунні блоки циліндрів), тип турбокомпресорів (зі змінною геометрією або без), або тип системи газорозподілу. Це може обмежувати точність моделей. Наприклад, у розділі 3.3 зазначено, що стінка камери згоряння починає пошкоджуватися через 20 секунд після втрати охолоджувальної рідини, але не уточнюється, як матеріал головки циліндра (алюміній або чавун) може впливати на швидкість нагрівання.

5. У розділі 4.2 (моделювання двофазних течій повітря з частинками пилу) зазначено залежність розподілу частинок пилу від розмірів, швидкості потоку та кутів повороту впускного колектора. Однак обмеження цих моделей, такі як вплив нестандартної геометрії впускних каналів, типів повітряних фільтрів або умов експлуатації (наприклад, запилення навколишнього середовища), не отримали достатнього освітлення. Це може ускладнити застосування методу реальних умовах.

6. Що стосується 6-го розділу, недостатньо відомостей про сферу застосування та обмеження запропонованих методів, щоб результати, висновки та рекомендації були більш реалістичними. Так, у розділі 6.4 описані експерименти для бензинових та дизельних двигунів, але відсутні дані щодо застосування методів до газових двигунів, де термічні навантаження або характер зносу можуть відрізнятися через особливості палива. Це обмежує універсальність запропонованих методів, особливо у контексті діагностики несправностей турбокомпресорів чи систем газорозподілу у таких двигунах.

7. У текст реферату включено мало даних про експериментальну базу дослідження, що застосовується, у тому числі про експериментальне обладнання та методи, хоча в самій дисертації (розділ 6.1 та додаток Б) експериментальна частина описана досить докладно.

На основі аналізу змісту дисертації та зауважень можна запропонувати здобувачу рекомендації для наступних досліджень, спрямовані на вдосконалення роботи з метою підвищення її універсальності та актуальності:

1. Перспективи подальшого вдосконалення запропонованого в дисертації методу визначаються тим, що не всі дані та методики, використані у роботі під час проведення досліджень технічного стану та визначення причин несправностей двигунів, доведені до рівня математичних моделей. У подальших дослідженнях доцільно розробити нові моделі пошкоджень

(наприклад, моделі пошкоджень клапанного механізму, поршневої групи тощо) та включити їх у запропоновану методику.

2. Враховуючи зростання популярності альтернативних видів палива, з метою підвищити універсальність методів і їх застосовність до сучасних транспортних засобів, доповнити розроблену методику, що викладена в розділі 6.4 та додатку Е аналізом застосування розроблених методів до газових (LPG, CNG) і гібридних двигунів. Це може включати додаткові дослідження особливостей термічних пошкоджень в таких процесах, оскільки температури згоряння там більш високі.

3. З метою подальшої практичної реалізації дані викладені в розділах 1.3 та 2.1 слід би доповнити порівняльним аналізом ключових параметрів (точність, час діагностики, застосовність) запропонованого логіко-імовірнісного методу із зарубіжними аналогами, такими як діагностичні підходи Bosch, стандарти SAE або методи, що використовуються в системах OBD-II, щоб порівняти алгоритми, які застосовуються в діагностичних сканерах. Це дозволить продемонструвати переваги розроблених методів, включаючи їхню незалежність від кваліфікації фахівця.

4. Для програмної реалізації запропонованих моделей та методів було б доречно розглянути автоматизацію методу дослідження. Для цього можна порекомендувати виконати додаткові дослідження, присвячені перспективам інтеграції розроблених методів із системами штучного інтелекту або автоматизованими діагностичними комплексами. Це могло б включати обговорення використання машинного навчання для аналізу даних логіко-імовірнісного та ретроспективного аналізу, а також моделювання процесів пошкоджень;

5. Проаналізувати можливість застосування запропонованого методу та моделей згідно зауважень 1-5, щоб розширити їх можливе застосування для більш широкого діапазону типів двигунів та умов експлуатації.

Однак, незважаючи на наведені вище зауваження та рекомендації щодо матеріалу дисертації, необхідно зазначити, що вони носять більш рекомендаційний характер і не зменшують високе наукове та практичне значення дисертаційної роботи.

9. Висновок:

Дисертація на тему «Метод експериментальної оцінки пошкоджень двигунів внутрішнього згоряння транспортних засобів» є закінченим науковим

дослідженням, виконаним на високому науковому рівні. Робота виконана здобувачем самостійно, вирішує актуальну наукову проблему, пов'язану з недосконалістю чинних методів автотехнічної діагностики при порушенні умов експлуатації, містить оригінальні результати та пропонує оригінальну комплексну методологію експериментальної оцінки пошкоджень двигунів внутрішнього згоряння з використанням моделювання процесів виникнення та розвитку несправностей.

Результати, положення та висновки дисертації мають наукову новизну, теоретичну значущість, практичну цінність і достовірність. Дисертація відповідає вимогам, які пред'являються до робіт на здобуття наукового ступеня відповідно пунктів 7, 8, 9 Постанови Кабінету Міністрів України від 17.11.2021 №1197 «Порядок присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», а здобувач Хрулев Олександр Едуардович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки».

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри суднових
енергетичних систем та комплексів
Одеського національного
морського університету

Білоусов Євген Вікторович

Засвідчує підпис

Фахівця ВК



Білоусов Євген Вікторович

ФАХІВЕЦЬ ВК