

ВІДГУК

офіційного опонента

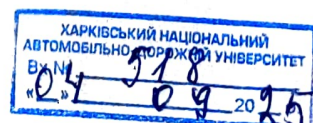
на дисертаційну роботу Хрулєва Олександра Едуардовича
«Метод експериментальної оцінки пошкоджень
двигунів внутрішнього згоряння транспортних засобів»,
що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.05.03 – Двигуни та енергетичні установки

Актуальність теми:

Незважаючи на досить швидку електризацію транспортної галузі двигуни внутрішнього згоряння продовжують залишатися основним джерелом енергії для більшості транспортних засобів, включаючи автомобілі, сільськогосподарську та будівельну техніку. Відповідно, надійність та довговічність ДВЗ безпосередньо впливають на експлуатаційні характеристики автотранспорту, його безпеку та економічну ефективність. При цьому конструкція сучасних двигунів стає все більш складною через необхідність задоволення безперервному зростанню вимог до екології, економії палива та безпеки експлуатації.

Все це вимагає все більш точної та достовірної діагностики для виявлення причин несправностей. Проте складність конструкції зумовлює складність діагностики несправностей. Внаслідок цього дослідження технічного стану ДВЗ та визначення причин їх несправностей є серйозним науково-технічним і практичним завданням, що додатково ускладнюється значною кількістю факторів, що впливають на роботу двигуна (порушення умов експлуатації, неякісний ремонт, виробничі дефекти, природний знос). Відсутність точних та об'єктивних методів діагностики, особливо при виникненні експлуатаційних відмов, призводить до помилок у визначенні причин несправностей, що тягне за собою повторні несправності, простої транспорту, а також значні економічні втрати.

З іншого боку, сучасні підходи до діагностики ДВЗ часто обмежені відсутністю комплексної методології, яка враховує як експлуатаційні пошкодження, так і виробничі дефекти, а також необхідність діагностування двигуна у стані відмови і навіть після його повного розбирання. Внаслідок цього виникає практична потреба у розробці нових методів оцінки пошкоджень ДВЗ та їх причин, включаючи логіко-ймовірні підходи та моделювання процесів пошкоджень у їх



розвитку, що дозволить скоротити час діагностики, підвищити її достовірність та запобігти повторній появі несправностей.

У такій ситуації математичні моделі, як частина загальної методології, дозволяють систематизувати дані про роботу вузлів, виявляючи приховані закономірності та причини несправностей, що особливо важливо для складних систем двигунів (наприклад, турбонаддув та системи управління), а також для його механічної частини, діагностування несправностей якої є окремим завданням.

Актуальність створення математичних моделей виникнення та розвитку несправностей автомобільних двигунів для визначення їх причин, своєю чергою, обумовлена цілою низкою факторів через ускладнення технологій двигунобудування, економічних вигод та екологічних вимог. Такі моделі підвищують точність діагностики, знижують витрати та сприяють розвитку предикативного обслуговування.

Однак, коли діагностика автомобільного двигуна неможлива або утруднена через його непрацездатність внаслідок несправності, актуальність створення математичних моделей виникнення та розвитку несправностей визначення їх причин ще більше зростає. У таких випадках моделювання стає ключовим інструментом для розв'язання проблеми. Моделі дозволяють здійснити реконструкцію подій, тобто ретроспективно аналізувати поведінку двигуна повністю на основі доступних даних (наприклад, архівів OBD-II, телеметрії або експлуатаційних записів). Це допомагає відновити ланцюжок подій, що призвели до виходу з ладу, навіть якщо двигун не запускається. Крім того, моделі роблять доступним аналіз непрямих даних – вони можуть використовувати непрямі параметри (вібрації, температура, тиск масла, дані з датчиків, записані до відмови) для локалізації та ідентифікації причини, а коли прямий доступ до двигуна неможливий, або коли двигун перебуває в непрацездатному після відмови стані – виявити аномалії, що вказують на причину.

Крім зазначених переваг, моделювання пошкоджень забезпечує зниження залежності результатів діагностики від фізичної діагностики. Наприклад, у разі повної непрацездатності двигуна традиційні методи (компресія, комп'ютерна діагностика) можуть бути обмежені. Тоді моделі, засновані на фізичних законах, дозволяють гіпотетично оцінити стан та розвиток пошкоджень, мінімізуючи необхідність поточних даних. Однак головна перевага моделей полягає в типізації несправностей, коли моделювання допомагає класифікувати несправності за

симптомами та умовами експлуатації. Це прискорює визначення причини навіть без прямого тестування, що найбільше характерно для відмов у механічній частині двигуна.

Отже, актуальність роботи визначається, з одного боку, необхідністю подальших досліджень у сфері діагностики автомобільних двигунів загалом, з другого – у розвитку методів діагностування, заснованих, зокрема, на математичному моделюванні робочих процесів.

Характеристика змісту дисертації

Дисертацію присвячено розробці методології експериментальної оцінки причин пошкоджень та розвитку несправностей двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) транспортних засобів. Робота складається із вступу, шести розділів і висновків на 412 сторінках, з бібліографією із 419 джерел, а також шести додатків (А–Е) обсягом 407 сторінок.

Робота характеризується повнотою охоплення теми з надзвичайно широкого кола питань, включаючи класифікацію пошкоджень, експериментальні дослідження, розробку моделей та моделювання пошкоджень з використанням сучасних комп'ютерних програм, з інструментальним та інформаційним забезпеченням експериментів, що робить дослідження завершеним та цілісним.

Структура роботи логічно вибудована та забезпечує послідовність викладу: від аналізу проблематики та сучасних підходів (розділ 1) до розробки методології та методів (розділи 2–5), опису результатів, їх експериментальної перевірки, апробації (розділ 6) та детального опису практичних методик, обладнання та інформаційного забезпечення досліджень (додатки).

Зміст реферату дисертації повністю відповідає самої дисертаційної роботі.

Дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.05.03 – Двигуни та енергетичні установки за пунктами:

9. Розроблення засобів, моделей, методів і методик для ідентифікації та діагностичного контролю технічного стану двигунів і енергоустановок.

11. Експлуатація та ремонт двигунів і енергоустановок, адаптація їх до експлуатаційних умов

Наукова новизна

Наукова новизна дисертації полягає у наступних ключових досягненнях та особливостях роботи:

1. Вперше запропоновано цілісну методологію визначення причин ушкоджень та розвитку несправностей двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) транспортних засобів. Вона поєднує теоретичні основи, практичні методи та методики, включаючи класифікацію дефектів, моделювання процесів пошкоджень та ретроспективний аналіз історії експлуатації, що забезпечує системний підхід до автотехнічних досліджень.

2. Вперше запропоновано оригінальний метод оцінки причин пошкоджень підшипників колінчастого валу при відмові системи змащення, що враховує вплив відцентрових сил на тиск подачі оливи. Цей метод дозволяє кількісно оцінити вплив нестачі змащення на пошкодження підшипників та диференціювати пошкодження залежно від конструкції двигуна та режиму роботи в момент відмови.

3. Вперше запропоновано метод оцінки причин пошкоджень деталей ДВЗ, спричинених особливостями конструкції системи очищення повітря, з урахуванням газодинамічних процесів та чисельного моделювання двофазних течій повітря з частинками пилу у впускних каналах. Метод дозволяє точно визначати траєкторії руху частинок пилу та їх вплив на нерівномірність зношування деталей по циліндрах.

4. Вдосконалено логіко-імовірнісний метод оцінки причин значних пошкоджень ДВЗ при порушенні умов експлуатації. Метод включає використання таблиць та логічного дерева відмов, що підвищує точність ідентифікації причин несправностей та їх причинно-наслідкових зв'язків.

5. Розроблено метод оцінки причин термічних пошкоджень деталей ДВЗ при їх перегріванні від втрати охолоджувальної рідини. Метод включає моделювання нестационарного нагріву та розрахунок температурного стану ключових елементів (датчика температури, стінки камери згорання, головки поршня), що є новим підходом до аналізу термічних відмов.

6. Розроблено метод оцінки причин пошкоджень та реконструкції руйнувань деталей ДВЗ в результаті гідравлічного удару в циліндрах. Метод використовує розрахункові газодинамічні моделі та метод скінченних елементів для ана-

лізу напружено-деформованого стану деталей шатунно-поршневої групи, що дозволяє детально моделювати та оцінювати характер деформацій деталей при позаштатних навантаженнях.

7. Проведено комплексну експериментальну оцінку запропонованих методів з використанням спеціалізованого обладнання, включаючи ендоскопію, вимірювання компресії, електронну діагностику тощо, зі зіставленням результатів моделювання з даними реальних пошкоджень ДВЗ. Це підтверджує достовірність та застосовність розроблених підходів.

8. Виконано систематизацію інформаційного забезпечення досліджень, з включенням ретроспективного аналізу історії експлуатації транспортного засобу до комплексу методів оцінки пошкоджень, що дозволяє встановлювати причинно-наслідкові зв'язки між технічним станом ДВЗ та подіями в експлуатації, що призвели до несправностей.

Наукова новизна результатів підтверджується оригінальністю запропонованих методів, їх інтеграцією в єдину методологію, а також використанням сучасних підходів до моделювання пошкоджень та їхньої експериментальної верифікації, що відрізняє роботу від наявних досліджень у діагностиці ДВЗ, розширюючи можливості діагностики пошкоджень на режими відмов та непрацездатного стану.

Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій

Наукові положення, висновки та рекомендації, представлені в дисертації, мають високий рівень обґрунтованості, що підтверджується наступними конкретними особливостями роботи:

1. Наукові положення роботи засновані на системному аналізі технічного стану двигунів внутрішнього згоряння як складної системи, що включає взаємодію вузлів, деталей та робочих процесів. У дисертації детально розглянуто експлуатаційні та виробничі дефекти, їх класифікацію та вплив на розвиток несправностей (розділ 1). Розроблені методи (логіко-імовірнісний, моделювання термічних пошкоджень, гідроудару, абразивного зносу та ін.) спираються на теоретичні основи механіки, газодинаміки, теплофізики та матеріалознавства, що забезпечує їхню наукову спроможність.

2. Для аналізу термічних пошкоджень застосовані моделі нестационарного нагріву (розділ 3.3), які враховують теплофізичні властивості матеріалів та

умови експлуатації. Моделювання двофазних течій повітря з частинками пилу (розділ 4.2) засноване на чисельних методах газодинаміки, при дослідженні гідравлічного удару в циліндрі використаний метод скінченних елементів для розрахунку напружено-деформованого стану деталей шатунно-поршневої групи (розділ 5.2–5.3), що забезпечують обґрунтованість висновків.

3. Достовірність запропонованих методів підтверджена результатами експериментальних досліджень (розділ 6), проведених з використанням спеціалізованого обладнання: ендоскопів, компресометрів, приладів електронної діагностики та ін. (додатки А, Б). Експерименти охоплювали реальні випадки несправностей ДВЗ, включаючи перегрів, абразивний знос, гідроудар (додаток Е) та відмови турбокомпресорів (розділи 2.5 та 6.4.8).

4. Зіставлення результатів моделювання з даними реальних пошкоджень (розділ 6.4) показує високу кореляцію, що підтверджує точність запропонованих методів та їх застосування для діагностики.

5. У дисертації застосовані методи статистичного аналізу для обробки експериментальних даних, що дозволило кількісно оцінити достовірність результатів (наприклад, при перевірці логіко-імовірнісного методу, розділ 2.4 та досліджень пошкоджень, розділ 6.4.8). Це свідчить об'єктивності висновків.

6. Розроблений метод ретроспективного аналізу історії експлуатації транспортного засобу (додаток Д.5) дозволяє встановити причинно-наслідкові зв'язки між подіями в експлуатації та технічним станом ДВЗ. Використання авторизованої та нормативно-технічної документації у дослідженнях (додаток Д) додатково підтверджує обґрунтованість висновків.

7. Розроблені методи та рекомендації апробовані в реальних умовах автотехнічних досліджень (розділ 6.5, додаток Е). Практична реалізація показала їх ефективність у визначенні причин несправностей, скороченні часу діагностики та запобіганні повторним відмовам, що підтверджує застосовність рекомендацій.

8. Результати досліджень зіставлені з відомими даними про пошкодження ДВЗ (розділи 2.1 та 6.4.5), що демонструє їх відповідність реальним процесам, а їх застосування в автотехнічній експертизі (додаток Д.3) підкреслює обґрунтованість рекомендацій для впровадження в галузь.

Таким чином, наукові положення, висновки та рекомендації дисертації обґрунтовані комплексним підходом, що включає теоретичне моделювання, експе-

риментальну перевірку, статистичну обробку даних та практичну апробацію. Використання сучасних методів аналізу та моделювання, спеціалізованого обладнання та ретроспективного підходу забезпечує високу достовірність результатів, а відповідність теоретичних оцінок експериментальним даним підтверджує практичну цінність висновків та рекомендацій.

Достовірність результатів дослідження

Робота базується на комплексній методології, що включає теоретичні моделі, чисельне моделювання та експериментальні методи (глави 2–5). Використання логіко-імовірнісного методу, моделей нестационарного нагрівання, газодинамічних розрахунків та методу скінченних елементів з використанням стандартних програм (розділи 3.3, 4.2, 5.2) забезпечує точний опис фізичних процесів, пов'язаних із пошкодженнями ДВЗ. Моделювання процесів пошкоджень (наприклад, нестационарного нагріву, двофазних течій повітря з частинками пилу, напружено-деформованого стану деталей при гідроударі) виконано з використанням сучасних чисельних методів, включаючи метод скінченних елементів (розділи 3.3, 4.2, 5.2). Моделі відкалібровані на основі експериментальних даних, що забезпечує точність моделювання.

З іншого боку, проведено великі експериментальні дослідження з використанням спеціалізованого обладнання, включаючи ендоскоп, компресометр, прилади електронної діагностики та значну кількість вимірювальних інструментів (розділ 6.1, додатки А, Б). Експерименти охоплювали реальні випадки несправностей ДВЗ, таких як перегрів, абразивний знос, гідроудар (додаток Е) та відмови турбокомпресора (розділ 6.4). Результати експериментів зіставлені з даними реальних ушкоджень (розділ 6.4.5), що підтвердило високу кореляцію між розрахунковими та фактичними характеристиками ушкоджень. Крім того, для аналізу експериментальних даних застосовано методи статистичної обробки, що дозволило кількісно оцінити достовірність результатів (розділи 2.4, 6.4.8). Це мінімізує суб'єктивність та забезпечує об'єктивність висновків, особливо під час перевірки логіко-імовірнісного методу та моделювання процесів пошкоджень. Крім того, в дисертації використано апробовані методи діагностики, такі як вимірювання компресії в циліндрах, ендоскопічне дослідження та аналіз властивостей моторної оливи (додаток А). Ці методи є стандартними в автотехнічній практиці,

що підтверджує надійність даних. На додаток до цього застосування ретроспективного аналізу історії експлуатації транспортного засобу (додаток Д.5) дозволяє встановити причинно-наслідкові зв'язки між умовами експлуатації та несправностями ДВЗ, а використання авторизованої та нормативно-технічної документації (додаток Д) додатково підтверджує достовірність висновків.

Розроблені методи апробовані у реальних умовах автотехнічних досліджень (розділ 6.5, додаток Е). Практична реалізація показала їх ефективність у визначенні причин несправностей, що підтверджується аналізом конкретних випадків відмов (наприклад, абразивне зношування, гідроудар, перегрів, розділ 6.4). Результати моделювання та експериментів зіставлені з відомими даними про пошкодження ДВЗ (розділ 6.4.5), що демонструє їхню відповідність реальним процесам. Наприклад, моделі гідроудару та термічних пошкоджень відтворюють характерні ознаки, що спостерігаються у практиці автотехнічних досліджень (додаток Е). Крім того, експериментальні дослідження проводилися з урахуванням строгих методик відбору проб рідин, палива та олив, а також контролю розмірів, форми та матеріалу деталей (додатки А, В), що виключає вплив випадкових та/або суб'єктивних факторів на результати.

Таким чином, достовірність дослідження забезпечена поєднанням теоретичного моделювання, експериментальної перевірки та практичної апробації результатів. Використання сучасних методів, спеціалізованого обладнання та ретроспективного аналізу, а також зіставлення теоретичних результатів із даними виконаних автотехнічних досліджень причин несправності гарантують надійність наукових положень та висновків дисертації.

Важливість результатів для науки та практики

Практична цінність дисертації визначається можливістю застосування розроблених методів у сферах, пов'язаних з експлуатацією, діагностикою та ремонтом ДВЗ. Так, запропоновані алгоритми, засновані на логіко-імовірнісному підході та моделюванні процесів, сприяють більш точному та надійному визначенню причин несправностей, що дозволяє оптимізувати ремонтні процеси, знизити витрати та продовжити термін служби двигунів. Результати дослідження можуть бути використані в автомобільній промисловості при проектуванні та випробуваннях ДВЗ, а також у виробничих процесах для контролю якості та запо-

бігання дефектам, включаючи виробничі та ремонтні. Крім того, розроблені методики можуть бути інтегровані у навчальні курси з двигунобудування, технічної діагностики та автотехнічної експертизи, сприяючи підготовці висококваліфікованих фахівців.

Розроблені методи оцінки причин несправностей при відмові систем змащення, охолодження, при гідроударі та впливу частинок пилу дозволяють скоротити час діагностики, підвищити її точність та мінімізувати суб'єктивність. Це особливо важливо при автотехнічних дослідженнях у сервісних центрах, а також для експертиз у страхових компаніях та при судових розглядах.

На підставі вищесказаного можна зробити висновок про те, що практична цінність дисертації полягає у створенні ефективних методів діагностики ДВЗ, які можуть бути впроваджені у ремонтну, експертну та освітню практику, скорочуючи економічні втрати та підвищуючи надійність автотранспорту. Важливість для науки обумовлена розвитком теоретичної бази діагностики та розширення її за допомогою нових методів моделювання та класифікації пошкоджень на раніше маловивчені режими та області відмов, що характеризуються непрацездатністю двигунів. Це створює фундамент для подальшого розвитку та вдосконалення технологій автотехнічних досліджень.

Зауваження та пропозиції

Незважаючи на наукову та практичну цінність результатів роботи, до дисертації є такі зауваження:

1. В недостатній мірі опрацьовано межі застосування методів для двигунів різних типів. Так, у розділах 2, 3 і 5 та додатку В недостатньо докладно розглянуто особливості застосування розроблених методів (наприклад, моделювання термічних пошкоджень, гідроудару або абразивного зносу) до двигунів різних конструкцій, з альтернативними видами палива, до газових та гібридних ДВЗ. Це суттєве обмеження особливо стосовно газових двигунів.

2. У розділі 4.2 (моделювання двофазної течії повітря з частинками пилу) недостатньо уваги приділено обмеженням чисельних моделей, особливо в умовах відхилення геометрії каналів впуску від розглянутої або застосування різних типів фільтрів. Це може ускладнити практичне застосування методу у різноманітних умовах експлуатації та ускладнити експертні висновки.

4. Практично не розглянуті дефекти матеріалів, що також приводять до виходу з ладу деталей ДВЗ. Це особливо актуально для шатунно-поршневої групи.

5. При моделюванні напружено деформованого стану стрижня шатуна при гідроударі (розділ 5.2) не зроблено оцінки, наскільки відрізняється результат для окремого стрижня від моделювання стрижня у складі цілого шатуна і збірки «поршень – палець – шатун».

6. Потребує суттєвого уточнення моделювання поведінки і руйнування поршня (поршневої групи) при гідроударі з урахуванням усіх дій і обмежень, що діють в ДВЗ на протязі розвитку дефекту.

7. Текст дисертації має граматичні помилки, що дещо утруднює читання.

На основі зазначених експертизи дисертації і зауважень пропонуються такі рекомендації для можливих наступних дій і досліджень:

1. Переробити дисертацію в монографію-довідник для широкого застосування технічної спільноти.

2. По розділі 1 рекомендую зробити повніше порівняння із закордонними аналогами пропонованих моделей.

3. Доцільно розширення аналізу щодо різних типів двигунів. Рекомендується доповнити аналізом застосування запропонованих методів до двигунів з альтернативними видами палива (газові, гібридні) та двигунів різної конструкції.

4. Бажано уточнити обмежень розроблених моделей. У розділі 4.2 рекомендується доповнити опис обмежень чисельних моделей двофазних течій, вказавши, як геометрія каналів впуску, типи фільтрів або умови експлуатації можуть вплинути на точність розрахунків. Слід також провести моделювання гідроудару з урахуванням взаємодії всіх деталей, що навантажуються від цього. Це підвищить застосування методу в реальних умовах.

4. Слід розширити опис методів дослідження матеріалів деталей, включивши, наприклад, металографічний аналіз для оцінки мікроструктури і її впливу на характер пошкоджень. Це зміцнить наукову основу аналізу дефектів.

5. Було-б доцільно навести більше практичних прикладів застосування пропонованих методів до різних типів двигунів (наприклад, дизельних, бензинових, комбінованих, у складі гібридних силових установок, тощо) та умов експлуатації (міський цикл, траса, екстремальні умови), щоб продемонструвати універсальність підходів.

Зазначені зауваження не є принциповими, і не ставлять під сумнів отримані результати та не знижують високого наукового та практичного значення дисертації, однак їх усунення та реалізація запропонованих рекомендацій у майбутніх дослідженнях дозволять підвищити універсальність, достовірність та практичну застосовність розроблених методів.

Висновок

Дисертація «Метод експериментальної оцінки пошкоджень двигунів внутрішнього згоряння транспортних засобів» представляє собою завершену наукову роботу, яка має внутрішню єдність, сукупність наукових теоретичних положень і експериментальних результатів, що свідчать про індивідуальний внесок здобувача у науку. Тема, зміст та результати дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.05.03, а робота відповідає вимогам пунктів 7, 8, 9 Постанови Кабінету Міністрів України від 17.11.2021 №1197 «Порядок присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук». На підставі цього вважаю, що 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 конструкції авіаційних двигунів
Національного аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут»

Білогуб Олександр Віталійович

Підпис проф. О.В.Білогуба засвідчую:

учений секретар університету

Литенко



[Signature]