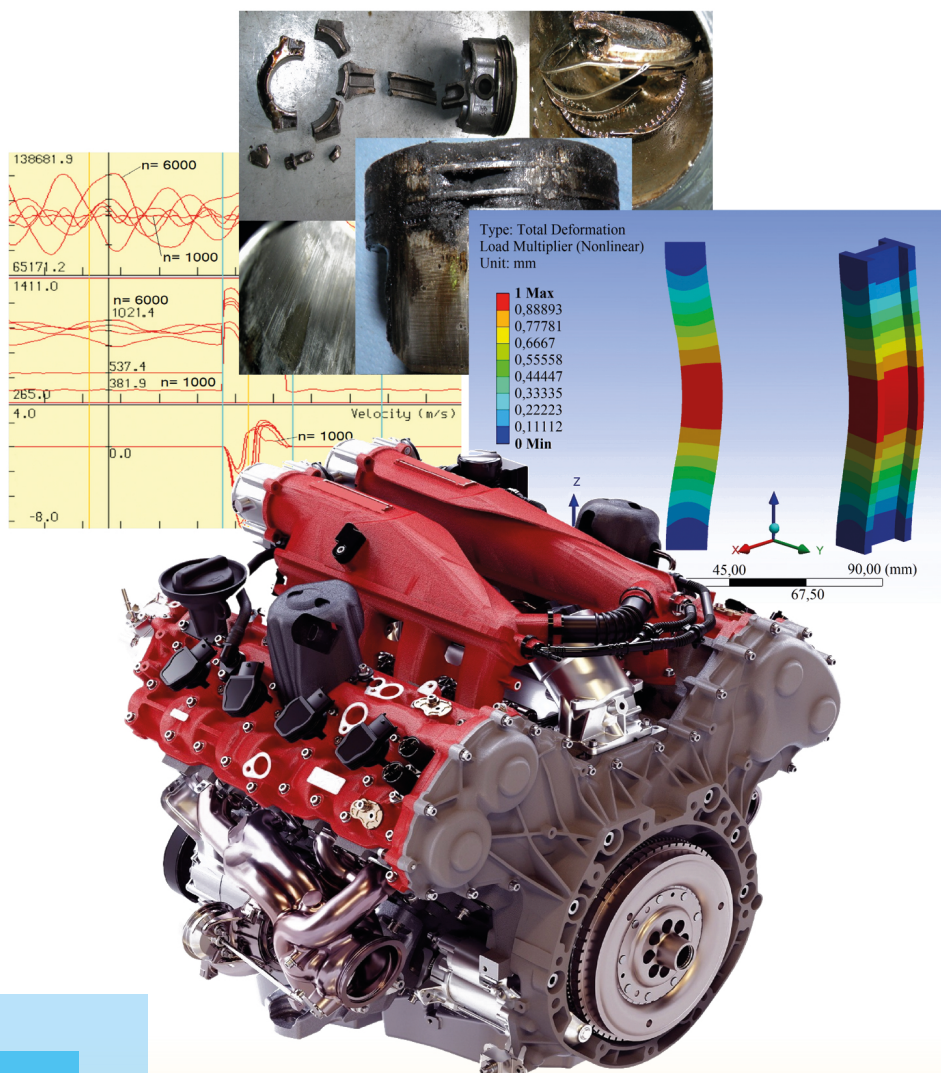


О. Е. ХРУЛЁВ, О. В. САРАЁВ, І. Ю. САРАЄВА

МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШКОДЖЕНЬ В ДВИГУНАХ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ



О.Е. Хрулев, О.В. Сараев, И.Ю. Сараева

**Методи моделювання пошкоджень
в двигунах внутрішнього згоряння
транспортних засобів**

Київ

2024

УДК 621.432

ISBN 978-966-479-131-8

X95

Монографія схвалена до публікації Вченою радою Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (Дозвіл № 66/24/4.16 від 31 травня 2024 року)

Рецензенти:

Кашканов Андрій Альбертович, доктор технічних наук, професор кафедри «автомобілів та транспортного менеджменту», Вінницький національний технічний університет

Спіфанов Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри конструкції авіаційних двигунів, Харківський національний аерокосмічний університет

Данець Сергій Віталійович, кандидат технічних наук, доцент, перший заступник директора, Харківський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України

Хрулев О.Е. Методи моделювання пошкоджень в двигунах внутрішнього згоряння транспортних засобів : монографія / О.Е. Хрулев, А.В. Сараєв, І.Ю. Сараєва. – Київ : УкрІНТЕІ, 2024. – 190 с.

У роботі отримали подальший розвиток, удосконалені та оновлені методи, які дозволяють досліднику (експерту) формалізувати процес розвитку несправності та пошкоджень в двигунах внутрішнього згоряння транспортних засобів у випадках порушень умов їх експлуатації. Розроблені, вирішені та досліджені математичні і комп'ютерні моделі, а саме: модель зміни тиску (компресії) в циліндрі під час його діагностування; модель розвитку локального абразивного зносу у циліндрах в залежності від перерозподілу частинок пилу у впускних трубопроводах при різних радіусах повороту повітряного потоку у впускних колекторах; модель розрахунку траєкторії руху одиначної частинки з відхиленням від ліній течії повітря при русі по радіусу впускного колектору; моделі виникнення та розвитку ушкоджень при попаданні в циліндр двигуна різних видів рідин (гідроудару) і отримано залежність величини деформації стержня шатуна від обсягу заповнення камери згоряння рідиною; моделі перегріву поршня та стінок головки циліндра при відмові системи охолодження; модель локального термічного пошкодження впускного клапана при відмові сучасної системи автоматичного регулювання фаз газорозподілу; модель пошкоджень підшипників колінчастого валу у випадку зниження тиску у системі змазки двигуна. Розроблені моделі та методи дозволяють об'єктивно, шляхом розрахунку при проведенні експертних досліджень оцінити причини та розвиток несправності двигуна внутрішнього згоряння транспортних засобів.

Для експертів, дослідників, конструкторів і інженерів з експлуатації двигунів внутрішнього згоряння транспортних засобів, здобувачів вищої освіти (студентів, аспірантів).

іл. 131, табл. 3, Бібліогр. 168

ISBN 978-966-479-131-8

© О.Е.Хрулев, О.В.Сараєв, І.Ю.Сараєва, 2024

The monograph is approved for publication by the Academic Council of Kharkov National Automobile and Highway University (Permission No. 66/24/4.16 dated May 31, 2024)

Reviewers:

Andrey A. Kashkanov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automobiles and Transport Management, Vinnitsa National Technical University

Sergey V. Epifanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Aviation Engine Design, Kharkov National Aerospace University

Sergey V. Danets, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, First Deputy Director, Kharkov Research Expert Forensic Center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine

Khrulev O.E. Methods for modeling damage in internal combustion engines of vehicles : monograph / O.E. Khrulev, A.V. Saraev, I.Yu. Saraeva. – Kyiv : UkrISTEI, 2024. – 190 p.

The work further developed, improved and updated methods that allow the researcher (expert) to formalize the processes of faults and damage in internal combustion engines of vehicles in cases of breakage of their operating conditions. Mathematical and computer models have been developed, solved and studied, namely: a model of changes in pressure (compression) in cylinders during its diagnosis; model of the development of local abrasive wear in cylinders depending on the redistribution of dust particles in the intake pipes at different radius of the air flow turning in the intake manifolds; model for calculating the trajectory of a single particle with deviation from the air flow lines when moving along the radius in the intake manifold channels; models of the occurrence and development of damage when different types of liquids enter the engine cylinder (hydrolock) and the dependence of the magnitude of the connecting rod deformation on the filling ratio of the combustion chamber with liquid is obtained; models of overheating of the piston and cylinder head walls in the event of a cooling system failure; model of local thermal damage to the intake valve when a modern automatic valve timing control system fails; model of damage to crankshaft bearings when pressure in the engine lubrication system emergency decreases. The developed models and methods make it possible to objectively assess the causes and development of faults and failures in the internal combustion engine of vehicles through calculations during expert studies. For experts, researchers, designers and engineers for the operation of internal combustion engines of vehicles, applicants for higher education (students, graduate students).

fig. 131, tab. 3, Bibliogr. 168

ISBN 978-966-479-131-8

© A.E. Khrulev, O.V. Sarayev, I. Yu. Sarayeva, 2024

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. ЗАГАЛЬНА КОНЦЕПЦІЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ДВИГУНІВ	12
2. МОДЕЛЮВАННЯ ПОШКОДЖЕНЬ, ЩО ВИЯВЛЯЮТЬСЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИМІРЮВАННЯ КОМПРЕСІЇ У ЦИЛІНДРІ.....	14
2.1. Математична модель процесу в циліндрі при холодному прокручуванні двигуна	18
2.2. Налаштування моделі холодного прокручування	25
2.3. Результати моделювання компресії при різному стані циліндро-поршневої групи та клапанного механізму, порівняння з експериментальними даними.....	29
2.4. Визначення зв'язку величини компресії з різними видами пошкоджень деталей двигуна та умов проведення вимірювань.....	33
3. МОДЕЛЮВАННЯ ПОШКОДЖЕНЬ В РЕЗУЛЬТАТІ ВПЛИВУ АБРАЗИВНИХ ЧАСТИНОК	37
3.1. Деякі особливості фільтрації повітря в автомобільних двигунах.....	42
3.2. Особливості конструкції, які можуть вплинути на абразивне зношування	48
3.3. Особливості розподілу пилу в впускних каналах, що розгалужуються...	49
3.4. "Радіусна" модель розрахунку розподілу пилу в каналах, що розгалужуються.....	51
3.5. Модель обліку впливу відхилення частинки від лінії течії на розподіл частинок по каналах, що розгалужуються.	55
3.6. Моделювання перерозподілу частинок у впускних каналах, що розгалужуються, за "радіусною" моделлю.	56
3.7. Моделювання двофазних течій повітря з частинками пилу у впускній системі двигунів чисельним методом.....	61

3.8. Модель двофазної течії повітря з частинками пилу у каналі з бічним відведенням 90 градусів	62
3.9. Моделювання двофазної течії повітря з частинками пилу при різних кутах повороту потоку.....	73
4. МОДЕЛЮВАННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ПРИ ПОТРАПЛЯННІ РІДИН У ДВИГУН.....	82
4.1. Модель пошкодження шатуна в залежності від кількості рідини, що надійшла до циліндра при гідроударі	86
4.2. Вплив матеріалу та геометрії стрижня шатуна на характер ушкодження.....	94
4.3. Результати моделювання параметрів повітря в циліндрі при попаданні рідини	96
4.4. Визначення навантажень, що діють на поршень та поршневий палець при гідроударі	101
4.5. Моделювання процесу деформації деталей шатунно-поршневої групи двигуна при гідроударі в циліндрі за допомогою методу скінченних елементів	113
5. МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОШКОДЖЕНЬ У ДВИГУНАХ.	127
5.1. Моделювання процесу пошкодження двигуна при аварійному підтіканні охолоджувальної рідини.....	133
5.2. Модель нагрівання датчика температури, стінки камери згоряння та головки поршня при порушенні охолодження	138
5.3. Моделювання нестационарного нагрівання елементів двигуна після порушення охолодження.....	143
5.4. Модель температурного стану головки клапана при зміні режимів, що визначаються програмою регулювання фаз газорозподілу	145
5.5. Моделювання температурного пошкодження клапана при відмові системи регулювання фаз газорозподілу	155
6. МОДЕЛЮВАННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ПІДШИПНИКІВ ПРИ ПОРУШЕННІ ЗМАЩЕННЯ.....	159

6.1. Оцінка впливу відцентрових сил на змащення підшипників	164
6.2. Модель зміни тиску подачі оливи до підшипників після відмови системи змащення.....	166
6.3. Моделювання пошкодження підшипника при відмові системи змащення	170
ВИСНОВОК.....	174
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	177

Список умовних позначень та скорочень

u, v, w – швидкість потоку, м/с;
 p – статичний тиск, Па;
 V – об'єм, м³;
 T – абсолютна температура, К;
 t – температура за шкалою Цельсія, °С;
 ρ – густина, кг/м³;
 C_p – теплоємність газу при постійному тиску, Дж/кг·К;
 γ – показник адіабати;
 m – маса, кг;
 P – сила, Н;
 M – момент, Нм;
 τ – час, с;
 ϕ – кут повороту колінчастого валу, град (рад);
 ω – кутова швидкість, рад/с;
 n – частота обертання колінчастого валу, хв⁻¹;
 l, L, δ – характерний лінійний розмір, довжина та товщина, м;
 d, R – діаметр та радіус, мм;
 f, F – площа, м²;
 G – масова витрата газу, кг/с;
 ξ, μ – коефіцієнти гідравлічного опору та витрати;
 β, γ, ϕ – кут, град;
 σ – напруження, МПа;
 ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с;
 Q, A – кількість теплоти та робота, Дж;
 q – питомий тепловий потік, Вт/м²;
 α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м²·К;
 λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К;
 $Re = vd/\nu$ – число Рейнольдса;
 $Nu = \alpha d/\lambda$ – число Нуссельта;
LES – Lotus Engine Simulation (software);
ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння;
МСЕ – метод скінченних елементів;
ОР – охолоджувальна рідина;
ГБЦ – головка блоку циліндрів.

ВСТУП

У цій роботі розглядаються питання моделювання механізмів виникнення та розвитку різних несправностей у двигунах внутрішнього згоряння. З цією метою розглянуто низку раніше не помічених та/або недостатньо вивчених механізмів розвитку несправностей, серед яких ті, що викликають локальні експлуатаційні пошкодження в автомобільних двигунах. Для таких пошкоджень розглядаються математичні моделі досліджуваних процесів з метою отримання раніше не виявлених закономірностей для подальшого їх застосування в завданнях визначення причин несправностей.

Відомо, що важливе місце під час проведення досліджень технічного стану займають діагностичні роботи, зокрема, з вимірювання компресії в циліндрі. Величина компресії, при правильному її вимірі та інтерпретації результатів дозволяє визначити багато видів ушкоджень та несправностей або хоча б звузити коло пошуку їх причин. Однак, всі рекомендації та методики вимірювання компресії зараз ґрунтуються виключно на досвідчених даних. В результаті без моделі досліджуваного процесу експерт-дослідник виявляється позбавлений важливого інструменту і змушений діяти за чужими рекомендаціями, що нерідко дають неточні та навіть помилкові дані стосовно конкретного двигуна, його температурного стану та інших параметрів.

Серед пошкоджень, що часто зустрічаються, одне з головних місць займає абразивне зношування при порушенні очищення (фільтрації) повітря у впускній системі сучасних двигунів. Характерною особливістю даного процесу є те, що навіть застосування якісних фільтрів не може повністю виключити попадання у двигун абразивних частинок. І ця особливість може зробити найбільш вирішальний вплив на ресурс і надійність автомобільного двигуна. У практиці експертних досліджень причин несправностей великої кількості автомобільних двигунів були відзначені випадки, при яких у двигуні виявляється значне абразивне зношування за відсутності явних порушень герметичності елементів впускної системи.

Такі випадки нерідко ставили дослідників-експертів, котрі проводили визначення причини несправності, у глухий кут. Особливо це стосується таких пошкоджень, які мають суто локальний характер, при якому пошкодження зосереджені в одному місці, наприклад, в межах одного циліндра багатоциліндрового двигуна. До локальних пошкоджень відносяться також докладно розглянутий у роботі гідроудар у циліндрі від потрапляння рідини, порушення охолодження різних елементів та різні види порушення змащення підшипників.

Справді, найчастіше такі випадки приписувалися виробничим дефектам двигуна. Що цілком зрозуміло – якщо несправність має локальний характер, то локальне пошкодження стає досить важливою ознакою виробничого дефекту. Наприклад, дефектна деталь в одному з циліндрів викликає локальні пошкодження саме в цьому циліндрі при мінімальному розширенні зони пошкоджень на інші циліндри двигуна. І двигун виходить з ладу, як правило, при порівняно невеликому напрацюванні (пробігу автомобіля).

Однак практика показує, що за простотою процесів, що здається, насправді ховається зовсім не та причина, яка легко пояснює те, що відбувається. Збіг ознак несправності може ускладнити правильне визначення її причини. Це нерідко і трапляється на практиці, де для правильного визначення причини необхідно шукати й інші ознаки, які підтверджують ту чи іншу версію, що розглядається. Навпаки, для пояснення необхідно не тільки докласти зусиль для аналізу всіх ознак пошкодження, а й у тому числі створити математичні моделі процесів, щоб виконати їхнє моделювання. І лише тоді можна знайти деякі раніше не виявлені закономірності, щоб правильно зрозуміти та пояснити механізм процесів.

Водночас далеко не всі особливості роботи реальної конструкції в реальних умовах експлуатації можна врахувати за допомогою моделей, що використовуються для цього. Наприклад, при створенні нових автомобільних двигунів внутрішнього згоряння заведено використовувати 3D-моделювання для визначення як навантажень, що діють, так і особливостей течії повітря і газів з метою оптимізації конструкцій та їх характеристик. Незважаючи на досить серйозний розвиток чисельних методів моделювання, які застосовуються для задач проєктування двигунів, практично відсутні методики моделювання різних несправностей, недостатньо опрацьовані питання застосування відомих математичних моделей до завдань пошкодження деталей і вузлів ДВЗ. Багато розрахункових моделей мають обмеження і поширюються лише на область робочих режимів. В результаті традиційні принципи моделювання, покладені в основу проєктування та дослідження процесів, у загальному випадку не підходять для експлуатаційних завдань, що розглядають пошкодження та несправності двигунів як відхилення від нормальних робочих режимів.

Саме так відбувається і з розглянутими у роботі пошкодженнями. Недостатня увага до методів моделювання різних пошкоджень ДВЗ є причиною неповноти опису в багатьох джерелах деяких поширених видів несправностей, їх ознак та причин. У багатьох практичних випадках пошук причини несправності передбачає трудомістку роботу з аналізу численних можливих причин, яка може мати суб'єктивний характер та сильно залежати від

кваліфікації експерта. Це може призвести до помилкового визначення причин несправності.

При цьому випадки виявлення аномального виду ознак пошкоджень викликали необхідність, з одного боку, пояснити їх виникнення, з іншого – виробити алгоритми їх дослідження та моделювання, щоб з третього – визначити можливості та способи усунення пошкоджень. Або хоча б зменшення їх шкідливого впливу на надійність та довговічність двигунів.

Для розв'язання цих проблем необхідний не тільки правильний загальний підхід, а й приватні методи, алгоритми та моделі для визначення причин несправностей двигунів, які нині відсутні. Методи визначення причин несправностей, що застосовуються, не повною мірою враховують особливості та умови експлуатації двигунів, не мають достатнього опрацювання до формальних алгоритмів, внаслідок чого не дозволяють належним чином надійно виявляти причини несправностей без тривалого аналізу всіх можливих причин та їх ознак.

Вирішенню всіх цих завдань і присвячена ця книга.

Книга складається із шести розділів.

У першому розділі дана загальна концепція моделювання процесів та механізмів виникнення та розвитку несправностей двигуна. Визначено роль, можливості, призначення та особливості математичного моделювання процесів, що призводять до пошкодження та виходу з ладу двигунів. Показано різницю між моделюванням експлуатаційних пошкоджень і моделюванням в ході проектно-дослідницьких робіт, що пояснює, чому відомі моделі погано застосовні для дослідження несправного двигуна.

У другому розділі розглянуто питання діагностування пошкоджень за допомогою вимірювання компресії у циліндрі. Представлено математичну модель та надано результати моделювання внутрішньоциліндрових процесів при діагностичному вимірі компресії в циліндрі. За результатами моделювання виконано докладний аналіз впливу режимів роботи, а також велику кількість пошкоджень та несправностей на компресію.

Третій розділ книги присвячений локальному абразивному зносу від перерозподілу частинок пилу у вхідних трубопроводах під дією центрифугування при повороті повітряного потоку у бічні виходи. Представлено «радіусну» модель розрахунку траєкторії одиничної частинки з відхиленням від ліній повітряного потоку, що рухається радіусом. Моделювання двофазного повітряного потоку з частинками проводилося методом кінцевих об'ємів, що загалом підтвердило дані, отримані з використанням радіусної моделі. Це характеризує механізм абразивного зношування, зумовлений виключно локальним збільшенням абразивної дії

частинок. Зазначається, що це може призвести до катастрофічного зносу двигуна навіть при цілком нормальній фільтрації повітря і зносостійкості деталей, що труться.

У четвертому розділі книги докладно розглянуто моделі виникнення та розвитку пошкоджень при попаданні в циліндр двигуна різних рідин. Приділено увагу як термодинамічних моделей, так і моделей напружено-деформованого стану стрижня шатуна при втраті стійкості. Докладно розроблено модель локального пошкодження деталей шатунно-поршневої групи та модель деформації шатуна при попаданні рідини в циліндр ДВЗ (гідроудар). Отримано залежність величини деформації від коефіцієнта заповнення камери згоряння рідиною. За допомогою моделювання встановлено величини деформації штока шатуна, спідниці поршня та поршневого пальця при перевантаженнях, спричинених гідроударом. Таким чином, запропонована модель дозволяє об'єктивно оцінити залишкову деформацію деталей двигуна та дає досить повну та об'єктивну картину процесу деформації та руйнування деталей двигуна при гідроударі. Це дозволяє пояснити складний процес руйнування не тільки шатуна, а й спідниці поршня та поршневого пальця.

У п'ятому розділі описано модель та результати моделювання локальних термічних пошкоджень двигунів. Розроблено модель відмови системи охолодження, яка дозволила об'єктивно відтворити механізм відмови з локальними пошкодженнями камери згоряння циліндра двигуна у вигляді стоплення стінок, появи тріщин, випадання сідел клапанів. При моделюванні локального термічного пошкодження впускного клапана при відмові системи регулювання фаз газорозподілу відмічено помітне підвищення температури клапанної тарілки щодо робочої температури на режимах повного відкриття клапанів. Встановлено, що локальне підвищення температури клапана лише коштом зменшення тривалості фази впуску та висоти підйому клапана може призвести до термічної деформації (повзучості) клапана та виходу двигуна з ладу.

У шостому розділі розглянуто локальні пошкодження підшипників двигуна та описано модель течії оливи по каналах колінчастого валу в полі відцентрових сил, яка адаптована для типових конструкцій колінчастого валу. На моделі показано ефект підтримання подачі оливи до шатунних підшипників протягом певного часу з моменту відмови в системі мащення та його залежність від конструкції та режиму роботи двигуна. Результати моделювання дозволили пояснити різницю в умовах змащення та ступеня пошкодження корінних та шатунних підшипників у аварійних випадках відсутності подачі оливи. Це ключова інформація для низки практичних випадків щодо причин несправності.

За результатами дослідження зазначено, що розроблені моделі можуть бути використані на практиці щодо причин несправностей двигунів різного типу, а їх використання в експертних дослідженнях дозволяє підвищити точність і об'єктивність експертних висновків. Таким чином, у книзі об'єднані наявні на сьогодні відомості про математичні моделі виникнення та розвитку різних несправностей двигуна з урахуванням особливостей досліджень, що проводяться, у тому числі в рамках судової та позасудової експертизи технічного стану транспортних засобів.

При написанні книги використано багаторічний практичний досвід к.т.н., старшого наукового співробітника Хрулева О.Е. з експлуатації, ремонту та експертного дослідження несправностей двигунів. Розділ 2 написано спільно к.т.н., с.н.с. Хрулевым О.Е. та к.т.н., доц. Сараєвой І.Ю. Розділи 3–6 написані к.т.н. Хрулевым О.Е., введення, розділи 1 і 3 написані спільно к.т.н. с.н.с. Хрулевым О.Е. та доктором технічних наук, професором Сараєвим О.В., який також розробив загальну концепцію книги, написав Висновок і вніс цінні зауваження та виправлення під час підготовки рукопису до видання.

Книга призначена експертам, дослідникам, конструкторам та інженерам з експлуатації двигунів внутрішнього згоряння транспортних засобів, але може бути корисною також претендентам вищої освіти, студентам та аспірантам за спеціальностями, пов'язаними з експлуатацією транспортних засобів.

Підписано до друку 19.06.2024 р. Формат 70х100х16 Папір мат 130г
Гарнітура Times New Roman Суг. Віддруковано на різнографі
Ум. друк. арк. 37.41
Тираж 300 прим. Ціна договірна

Редакція: ДНУ «Український інститут науково-технічної експертизи та інформації» (УкрІНТЕІ)
03150, м. Київ, вул. Антоновича, 180
Тел. (044) 521-00-10, e-mail: uintei@uintei.kiev.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5332 від 12.04.2017 р.



Хрулев Олександр Едуардович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, судовий автоексперт, керівник приватного підприємства "Міжнародне Моторне бюро"



Сараєв Олексій Вікторович, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів ім. А. Б. Гредескула, Харківський національний автомобільно-дорожній університет



Сараєва Ірина Юріївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної експлуатації та сервісу автомобілів ім. М. Я. Говорущенко, Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Ця книга присвячена визначенню причин важких пошкоджень, складних несправностей та відмов двигунів внутрішнього згоряння транспортних засобів. Книга узагальнює досвід авторів у їх багаторічних дослідженнях цих питань шляхом застосування методів математичного і комп'ютерного моделювання, проведення багатофакторних експериментів та науково-технічних експертиз.

Книга затверджена до друку Вченою Радою Харківського національного автомобільно-дорожнього університету та рекомендована Вченою Радою Автомобільного факультету, а також кафедрою автомобілів ім. Гредескула для студентів, аспірантів, інженерів, експертів, фахівців і науковців у галузях, пов'язаних із дослідженням експлуатація та ремонту транспортних засобів, їх агрегатів, механізмів та систем.