

О. В. ЄРИГАНОВ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри суднових енергетичних систем і комплексів
Одеський національний морський університет
ORCID: 0000-0002-9736-3662

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

Зростання теплонапруженості та ускладнення конструкції суднових дизельних двигунів посилюють вимоги до швидкого та точного контролю їх технічного стану під час експлуатації. Перехід флоту до експлуатації із мінімальними зупинками робить традиційні періодичні методи діагностування недостатніми, оскільки вони не дозволяють своєчасно реагувати на зміну параметрів робочого процесу. Метою роботи є обґрунтування концепції побудови автоматизованої системи діагностування суднових дизельних двигунів, яка забезпечує оперативне визначення відхилень технічного стану на основі аналізу ключових параметрів робочого процесу. У роботі використано методи систематизації наукових джерел, порівняльного аналізу діагностичних підходів та узагальнення теоретичних положень, що стосуються індикаторних, параметричних і прогностичних алгоритмів. Додаткову увагу приділено можливостям застосування інтелектуальних моделей для підвищення точності ідентифікації аномалій. Показано, що найбільш інформативними параметрами для діагностики в реальному часі є максимальний тиск згоряння, температура відпрацьованих газів і циклова нерівномірність, які першими реагують на зміни паливоподачі або зношування циліндро-поршневої групи. Проаналізовано переваги й обмеження індикаторних, параметричних та інтелектуальних методів, визначено доцільність їх комбінування. Сформовано рекомендації щодо побудови архітектури системи діагностики, що передбачає інтеграцію блоку первинного вимірювання, алгоритмів визначення положення верхньої мертвої точки, параметричних моделей та інтелектуальних модулів прогнозування. Отримані висновки підтверджують можливість практичного застосування отриманих результатів під час проектування бортових систем контролю технічного стану, оптимізації експлуатаційного обслуговування та підвищення безпеки експлуатації флоту. Подальші дослідження доцільно спрямувати на адаптацію математичних моделей до нестационарних режимів, удосконалення методів визначення фаз газорозподілу та інтеграцію додаткових діагностичних каналів, зокрема віброакустичних.

Ключові слова: робочий процес, технічний стан, параметрична діагностика, індикаторні методи, термодинамічні рівняння.

O. V. YERYGANOV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Ship Power Systems and Complexes
Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0002-9736-3662

AUTOMATED REAL-TIME MARINE ENGINE DIAGNOSTICS SYSTEMS

The increase in thermal stress and the complexity of marine diesel engine design increase the need for quick, accurate control of their technical condition during operation. The transition of the fleet to operation with minimal stops makes traditional periodic diagnostic methods insufficient, as they do not allow for timely responses to changes in the working process parameters. The purpose of the work is to substantiate the concept of an automated system for diagnosing marine diesel engines that provides prompt determination of deviations in the technical condition by analyzing key parameters of the working process. The work uses methods of systematizing scientific sources, comparative analysis of diagnostic approaches, and generalization of theoretical provisions relating to indicator, parametric, and predictive algorithms. Additional attention is paid to the potential of intelligent models to improve anomaly identification accuracy. It is shown that the most informative parameters for real-time diagnostics are the maximum combustion pressure, exhaust gas temperature, and cyclic unevenness, which respond first to changes in fuel supply or wear of the cylinder-piston group. The advantages and limitations of indicator, parametric and intelligent methods are analyzed, and the feasibility of their combination is determined. Recommendations are made for the architecture of the diagnostic system, which involves integrating the primary measurement unit, algorithms for determining the top dead center position, parametric models, and intelligent prediction modules. The conclusions confirm the practical applicability of the results when designing

on-board technical condition monitoring systems, optimizing operational maintenance, and increasing the safety of fleet operations. Further research should be directed at adapting mathematical models to non-stationary modes, improving methods for determining the gas distribution phases and integrating additional diagnostic channels, in particular vibroacoustic ones.

Key words: *working process, technical condition, parametric diagnostics, indicator methods, thermodynamic equations.*

Постановка проблеми

Ефективність функціонування суднових енергетичних установок напряму залежить від точності контролю робочого процесу дизельного двигуна та своєчасного виявлення відхилень його технічного стану. Зростання теплонпруженості сучасних дизелів і підвищені вимоги до економічності спричиняють необхідність переходу від періодичних вимірювань до автоматизованого діагностування в реальному часі. Навіть незначні зміни тиску згоряння або параметрів циклової подачі можуть свідчити про ранні стадії порушення робочого процесу. Тому актуальним завданням є створення систем, здатних у динаміці відстежувати термодинамічні параметри й оперативно ідентифікувати відхилення, що впливають на надійність дизеля.

Разом із тим, традиційні методи аналізу індикаторних діаграм вже не повністю відповідають практичним умовам експлуатації суден. Дослідження доводять, що висока циклова нерівномірність і флуктуації тиску, характерні для транспортних дизелів, ускладнюють застосування класичних алгоритмів оброблення сигналів, особливо на нестационарних режимах [1, с. 39–42; 2, с. 42–45]. Визначення верхньої мертвої точки та параметрів теплового стану циліндро-поршневої групи потребує точніших моделей і методів, адаптованих до роботи в реальному часі. Таким чином, проблема полягає не тільки в вимірюванні параметрів, а й у розробленні стійких алгоритмів інтерпретації термодинамічних рівнянь, які враховують швидкоплинні зміни робочого процесу.

Паралельно з цим, глобальна тенденція розвитку діагностичних систем свідчить про швидке впровадження методів параметричної діагностики та інтелектуальних моделей. Аналіз сучасних підходів доводить, що комбінування індикаторних даних із прогностичними алгоритмами ймовірнісного оцінювання дозволяє значно підвищити точність виявлення аномалій і визначення меж «здорового» стану двигуна [3; 4]. Використання нейронних мереж і методів глибокого навчання для аналізу структурних відхилень у робочому процесі відкриває нові можливості для ранньої діагностики, однак вимагає адаптації під специфіку дизелів транспортного флоту та їх реальних режимів роботи.

Отже, існуючі дослідження створюють міцний теоретичний базис, проте не забезпечують комплексного вирішення проблеми побудови автоматизованих систем діагностики, які працюють безперервно й оперативно реагують на зміни технічного стану. Низка питань залишається відкритою: інтеграція індикаторних і віброакустичних параметрів, підвищення точності визначення фаз газорозподілу, адаптація математичних моделей до умов плавання та кореляція термодинамічних рівнянь із реальними навантаженнями. Саме тому формування сучасної архітектури систем діагностики суднових дизелів у реальному часі є актуальною науковою та практичною задачею, важливою для підвищення ефективності і безпеки експлуатації флоту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У наукових працях останніх років простежується кілька провідних напрямів розвитку діагностики суднових дизелів, що формують підґрунтя для автоматизованих систем контролю робочого процесу в реальному часі. Один із ключових напрямів пов'язаний з аналізом індикаторних діаграм. Так, О. Єриганов та ін. показують, що індикаторну діаграму можна використовувати для точного визначення циклової подачі палива, а відхилення її параметрів свідчать про початкові зміни технічного стану паливної апаратури [5]. У продовження цього напрямку О. Єриганов, В. Гунченко та В. Глебов застосували індикаторну діаграму для визначення невідомих розмірів деяких деталей кривошипно-шатунного механізму [6].

У праці С. Сагіна, С. Бондар і Т. Столярика науковці розкривають важливість оцінювання деградації моторного мастила для прогнозування безвідмовності суднових дизелів [7], а також в окремій роботі Т. Столярик уточнює вплив механічних втрат під дією змінних навантажень [8]. Хоча ці дослідження доповнюють розуміння зміни технічного стану, вони не охоплюють динаміку швидкоплинних процесів, характерних для реальних режимів.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із розвитком параметричної діагностики. Так, Р. Варбанець та ін. запропонували структуру системи діагностування в реальному часі, що враховує залежність ключових показників від положення верхньої мертвої точки (верхня мертва точка – ВМТ) [9]. Ці підходи розвинено в наступній роботі Р. Варбанець та ін., де науковці систематизували методи параметричної діагностики для морських дизелів і показали їхню ефективність при дослідженні робочого процесу [10]. Важливе узагальнення подано В. Заложем, який окреслив нерівномірність розвитку систем діагностики в різних країнах і наголосив на відсутності єдиних алгоритмічних стандартів, що ускладнює побудову інтегрованих систем реального часу [11].

Міжнародні дослідження додають глибини аналізу. У статті Й. Висоцькі (J. Wysocki) та К. Вітковські (K. Witkowski) запропонували вдосконалені методи аналізу індикаторних діаграм і характеристик тепловиділення,

хоча їх обчислювальна складність обмежує практичну реалізацію на борту суден [12]. У свою чергу, Б. Пуздровска (B. Puzdrowska) порівнює методи діагностування на основі параметрів робочого тіла, особливо ентальпії відпрацьованих газів, але вказує на труднощі точного вимірювання температурних характеристик у нестационарних умовах [13]. У статті Р. Квартулло (R. Quartullo) та ін. продемонстровано можливості оцінювання тиску в циліндрі за даними обертів колінчастого вала за допомогою розширеного фільтра Калмана [14].

Узагальнення опрацьованих джерел показує, що дослідження є різноманітними, але фрагментованими. Залишаються невирішеними питання інтеграції індикаторних, віброакустичних і температурних сигналів, адаптації моделей до нестационарних режимів, уніфікації алгоритмів визначення ВМТ та оцінювання впливу деградації мастила на швидкоплинні термодинамічні зміни.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є обґрунтування підходів до створення автоматизованої системи діагностики судових дизельних двигунів у реальному часі, здатної точно оцінювати робочий процес та оперативно визначати відхилення технічного стану. Для досягнення зазначеної мети визначено такі завдання: 1) дослідити термодинамічні параметри робочого процесу та визначити ключові показники, що забезпечують інформативність діагностики в реальному часі; 2) проаналізувати сучасні методи індикаторної, параметричної та інтелектуальної діагностики транспортних дизелів і встановити їх практичні обмеження; 3) сформулювати рекомендації щодо побудови ефективної архітектури автоматизованої системи діагностування для судових дизельних двигунів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Аналіз термодинамічних характеристик робочого процесу судових дизельних двигунів показує, що найбільш інформативними для автоматизованої діагностики в реальному часі є максимальний тиск згоряння, температура відпрацьованих газів і циклова нерівномірність. Відхилення пікових значень тиску навіть на 5–7 % свідчать про початкові зміни роботи паливної апаратури [1, с. 38–39]. В дослідженнях цю залежність підтверджують, вказуючи на зміщення форми індикаторної діаграми при зменшенні циклової подачі палива [5, с. 50–53; 6, с. 30–32].

Для оцінювання технічного стану судового дизельного двигуна в реальному часі ключове значення мають параметри, які безпосередньо відображають зміну робочого процесу та теплового навантаження. Найбільш інформативними вважаються показники тиску згоряння, температура відпрацьованих газів і рівень циклової нерівномірності, оскільки їх відхилення першими реагують на порушення паливopoдачі, зношування елементів циліндро-поршневої групи та зміну режимів навантаження. Узагальнення цих характеристик у структурованому вигляді дає можливість сформулювати базу для побудови автоматизованих алгоритмів діагностування та визначити вимоги до точності вимірювань, що наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Основні термодинамічні показники робочого процесу судових дизелів, що використовуються в автоматизованій діагностиці в реальному часі

Показник	Діагностичне значення	Типові відхилення, що свідчать про несправність
Максимальний тиск згоряння	Характеризує ефективність згоряння, стан паливної апаратури та герметичність циліндро-поршневої групи (ЦПГ)	Зменшення на 5–7 % – порушення паливopoдачі; збільшення – передчасне згоряння
Тиск у ВМТ	Визначає теплове навантаження і ступінь стискання	Відхилення > 3 % – зношування кілець, клапанів або зміни фаз газорозподілу
Температура відпрацьованих газів	Показує повноту згоряння та тепловий стан	Підвищення > 20–30 °C між циліндрами – неправильна подача палива або засмічення форсунок
Циклова нерівномірність	Відображає стабільність робочого процесу та рівномірність подачі	Зростання – порушення паливopoдачі, нестабільність горіння
Швидкість наростання тиску	Характеризує інтенсивність згоряння	Підвищення – передчасне згоряння; зниження – погане розпилення палива
Показники індикаторної діаграми	Форма кривої тиску в циліндрі	Зміщення максимуму – зміни моменту упорскування або циклової подачі

Джерело: узагальнено автором на основі даних [1, с. 38–39; 3; 5, с. 50–53; 6, с. 30–32; 15; 16].

Сучасні підходи до діагностики транспортних дизельних двигунів демонструють, що індикаторні методи і надалі залишаються основою оцінювання технічного стану, оскільки вони безпосередньо відображають термодинаміку згоряння в циліндрі. Зміни форми індикаторної діаграми дозволяють фіксувати порушення паливopoдачі, однак їх використання в реальному часі ускладнюють коливання, шуми сигналу та циклові нерівномірності [5, с. 50–53; 12; 14].

Параметричні методи діагностики набувають все більшого поширення завдяки можливості оцінювання технічного стану без прямого вимірювання тиску в циліндрі. Запропоновані моделі, що враховують положення ВМТ, підвищують точність визначення ключових показників у режимі реального часу [9]. Міжнародні дослідження

підтверджують ефективність параметричних алгоритмів при змінних навантаженнях і демонструють їх придатність для суднових умов, хоча потреба в точному математичному калібруванні залишається суттєвим обмеженням [10, с. 72–74].

Інтелектуальні методи формують новий напрям розвитку діагностики, забезпечуючи можливість раннього прогнозування відмов на основі аналізу структурних відхилень робочого процесу. Використання прогнозних моделей штучного інтелекту дозволяє підвищити точність і швидкість виявлення несправностей, що підтверджено під час досліджень моделей прогнозування технічного стану. Моделі на основі багатомасштабного трансформера забезпечують високу чутливість до аномалій, але їхнє впровадження у суднових енергетичних установках ускладнюється обчислювальною складністю та вимогами до апаратних ресурсів. У таблиці 2 наведено відповідні порівняльні характеристики сучасних методів діагностики транспортних дизельних двигунів.

Таблиця 2

Порівняльна характеристика сучасних методів діагностики транспортних дизельних двигунів

Метод діагностики	Основні переваги	Практичні обмеження
Індикаторна діагностика (кривий тиску)	Висока інформативність щодо процесу згоряння; можливість визначення циклової подачі та моменту упорскування	Вплив механічних коливань і шумів сигналу; складність застосування в реальному часі; залежність від точності визначення положення ВМТ
Параметрична діагностика (оцінка стану без прямого вимірювання тиску)	Робота без датчика тиску в циліндрі; придатність для діагностики у реальному часі; можливість контролю на змінних навантаженнях	Необхідність точного калібрування моделей; залежність результатів від умов експлуатації; зниження точності при нестационарних режимах
Інтелектуальні методи (штучний інтелект, прогнозні моделі)	Раннє виявлення аномалій; здатність аналізувати складні нелінійні залежності; потенціал прогнозування відмов	Висока обчислювальна складність; вимоги до апаратних ресурсів; потреба в навчальних даних, специфічних для суднових дизелів

Джерело: узагальнено автором на основі даних [5, с. 50–53; 9; 10, р. 72–74; 12; 14].

Для забезпечення ефективної роботи автоматизованої системи діагностування суднових дизельних двигунів важливо сформувавши архітектуру, яка поєднує індикаторні, параметричні та інтелектуальні методи контролю. Ключовим елементом такої архітектури є наявність достовірного блоку первинного вимірювання з можливістю корекції сигналів, що дозволяє мінімізувати вплив шумів, коливань і нестационарності робочих режимів. Необхідним є також інтеграція алгоритмів визначення положення ВМТ, оскільки точність цього параметра визначає коректність подальших розрахунків термодинамічних показників і підвищує інформативність діагностики.

Важливим компонентом архітектури має стати модуль інтелектуального аналізу, здатний здійснювати прогнозування технічного стану та раннє виявлення відмов. Використання моделей штучного інтелекту доцільно поєднувати з параметричними алгоритмами, що дозволить компенсувати нестачу достовірних навчальних даних та адаптувати систему до змін режимів роботи. Завершальним елементом є блок рекомендаційної підтримки прийняття рішень, який формує попередження, визначає рівень ризику та пропонує оптимальні дії екіпажу. Рекомендовані структурні елементи архітектури сформовано у таблиці 3.

Таблиця 3

Рекомендації щодо побудови архітектури автоматизованої системи діагностики суднових дизельних двигунів

Елемент архітектури	Призначення	Очікуваний результат
Блок первинного вимірювання	Збір і фільтрація параметрів робочого процесу	Зменшення впливу шумів і коливань сигналу
Алгоритм визначення ВМТ	Калібрування параметричних розрахунків	Підвищення точності діагностики
Параметричний модуль	Розрахунок ключових показників без датчика тиску	Робота в реальному часі на змінних режимах
Інтелектуальний модуль	Аналіз відхилень і прогнозування відмов	Раннє виявлення несправностей
Блок підтримки рішень	Формування рекомендацій екіпажу	Скорочення часу реагування та ризику відмов

Джерело: власна розробка автора.

Комплексне поєднання індикаторних, параметричних та інтелектуальних методів створює основу для формування ефективної системи діагностування суднових дизельних двигунів у реальному часі. Запропоновані рекомендації щодо побудови архітектури забезпечать підвищення точності визначення технічного стану та скорочення часу реагування на відхилення робочого процесу, що є критично важливим для безпечної експлуатації флоту.

Висновки

Сучасні експлуатаційні режими вимагають створення систем, здатних у режимі реального часу відстежувати зміну термодинамічних параметрів, оперативно ідентифікувати відхилення робочого процесу та підтримувати високу надійність суднових енергетичних установок. У дослідженні визначено інформативні термодинамічні

показники, що формують основу автоматизованої діагностики в реальному часі. Особливу значущість мають максимальний тиск згоряння, температура відпрацьованих газів і циклова нерівномірність, зміна яких першою реагує на порушення паливоподачі або зношування циліндро-поршневої групи. Проаналізовано методи індикаторної, параметричної та інтелектуальної діагностики, встановлено їх переваги і практичні обмеження щодо застосування на борту суден. Сформовані рекомендації щодо побудови архітектури автоматизованої системи діагностування, яка передбачає комбіноване використання датчиків, параметричних моделей і прогнозних алгоритмів.

Наукова новизна роботи полягає у структурованому висвітленні підходів до інтеграції термодинамічних, параметричних та інтелектуальних методів в єдину діагностичну систему для транспортних дизелів, адаптовану до реального часу. Практична цінність полягає в можливості використання отриманих результатів під час розроблення бортових систем контролю технічного стану, вдосконалення експлуатаційних регламентів і підтримки рішень щодо технічного обслуговування за станом. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вирішення проблем точного визначення положення ВМТ під час роботи двигуна під навантаженням, удосконалення моделей адаптації до розроблення алгоритмів інтеграції віброакустичних і температурних сигналів.

Список використаної літератури

1. Залож В., Варбанець Р., Мінчев Д. Аналіз циклової нерівномірності для судових дизельних двигунів в режимі реального часу. *Водний транспорт*. 2025. № 1 (42). С. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.06>
2. Варбанець Р., Мінчев Д., Залож В. Аналітичний метод визначення верхньої мертвої точки поршня для системи параметричної діагностики судових дизелів. *Розвиток транспорту*. 2024. № 3 (22). С. 41–59. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2024.3-22.04>
3. Castresana J., Gabiña G., Quincoces I., Uriondo Z. Healthy marine diesel engine threshold characterisation with probability density functions and ANNs. *Reliability Engineering & System Safety*. 2023. Vol. 238. Article 109466. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109466>
4. Ensuring reliable and safe operation of trunk diesel engines of marine transport vessels / S. Sagin et al. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10. No. 10. Article 1373. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>
5. Розрахунок циклової подачі дизельного двигуна за даними індикювання робочого процесу / О. Єриганов та ін. *Залізничний транспорт України*. 2023. № 4. С. 49–55. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2023-149-4-49-55>
6. Єриганов О., Гунченко В., Глебов В. Визначення геометричних розмірів деталей кривошипно-шатунного механізму за результатами індикювання. *Розвиток транспорту*. 2024. № 2 (21). С. 28–34. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2024.2-21.03>
7. Сагін С., Бондар С., Столярик Т. Оцінка безвідмовності судових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення. *Водний транспорт*. 2023. № 1 (37). С. 59–70. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06>
8. Столярик Т. Прогнозування механічних втрат в судових дизелях. *Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник*. 2022. № 44. С. 142–156. DOI: <http://dx.doi.org/10.31653/smf44.2022.142-156>
9. Варбанець Р., Мінчев Д., Кучеренко Ю., Залож В. Параметрична діагностика судових дизельних двигунів в режимі реального часу. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2024. № 1. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2024.1.09>
10. Methods of real-time parametric diagnostics for marine diesel engines / R. Varbanets et al. *Polish Maritime Research*. 2024. Vol. 31. P. 71–84. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2024-0037>
11. Залож В. Огляд сучасних тенденцій розвитку систем діагностики судових дизельних двигунів по параметрам робочого процесу. *Розвиток транспорту*. 2024. № 1 (20). С. 44–56. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2024.1-20.05>
12. Wysocki, J., Witkowski K. Increasing the efficiency of marine engine parametric diagnostics based on analyses of indicator diagrams and heat-release characteristics. *Energies*. 2023. Vol. 16. No. 17. Article 6240. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16176240>
13. Puzdrowska B. Comparison of methods for diagnosing marine IC engines based on working medium parameters including exhaust gas specific enthalpy. *Combustion Engines*. 2025. Vol. 201. No. 2. P. 3–13. DOI: <https://doi.org/10.19206/CE-195438>
14. In-cylinder pressure estimation from rotational speed measurements via extended Kalman filter / R. Quartullo et al. *Sensors*. 2023. Vol. 23. No. 9. Article 4326. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23094326>
15. Fault diagnosis in internal combustion engines using artificial intelligence predictive models / N. Torres et al. *Applied System Innovation*. 2025. Vol. 8. No 5. Article 147. DOI: <https://doi.org/10.3390/asi8050147>
16. Chen M., Gan H., Wu H. Research on fault diagnosis method for marine diesel engines based on multi-scale attention mechanism transformer. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12. No 12. Article 2348. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12122348>

References

1. Zalozh, V., Varbanets, R., & Minchev, D. (2025). Analysis of cycle irregularity for marine diesel engines in real-time mode. *Water Transport*, 1(42), 37–45. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.06> [in Ukrainian].
2. Varbanets, R., Minchev, D., & Zalozh, V. (2024). Analytical method for determining the top dead center of a piston for parametric diagnostic systems of marine diesel engines. *Transport Development*, 3(22), 41–59. <https://doi.org/10.33082/td.2024.3-22.04> [in Ukrainian].
3. Castresana, J., Gabiña, G., Quincoces, I., & Uriondo, Z. (2023). Healthy marine diesel engine threshold characterisation with probability density functions and ANNs. *Reliability Engineering & System Safety*, 238, Article 109466. <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109466>
4. Sagin, S., Madey, V., Sagin, A., Stoliaryk, T., Fomin, O., & Kučera, P. (2022). Ensuring reliable and safe operation of trunk diesel engines of marine transport vessels. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10), Article 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>
5. Yeryhanov, O., Kyrnats, V., Hunchenko, V., Hliebov, V., & Kholdenko, V. (2023). Calculation of diesel engine cycle fuel delivery based on working process indicator data. *Railway Transport of Ukraine*, (4), 49–55. <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2023-149-4-49-55> [in Ukrainian].
6. Yeryhanov, O., Hunchenko, V., & Hliebov, V. (2024). Determining geometric dimensions of crank mechanism components based on indicator data. *Transport Development*, 2(21), 28–34. <https://doi.org/10.33082/td.2024.2-21.03> [in Ukrainian].
7. Sagin, S., Bondar, S., & Stoliaryk, T. (2023). Evaluation of marine diesel engine reliability based on the technical condition of motor oil in circulation lubrication systems. *Water Transport*, 1(37), 59–70. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06> [in Ukrainian].
8. Stoliaryk, T. (2022). Prediction of mechanical losses in marine diesel engines. *Ship Power Plants: Scientific and Technical Collection*, 44, 142–156. <http://dx.doi.org/10.31653/smf44.2022.142-156> [in Ukrainian].
9. Varbanets, R., Minchev, D., Kucherenko, Y., & Zalozh, V. (2024). Parametric diagnostics of marine diesel engines in real-time mode. *Internal Combustion Engines*, (1). <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2024.1.09> [in Ukrainian].
10. Varbanets, R., Minchev, D., Kucherenko, Y., Zalozh, V., Yeryhanov, A., Kyrylash, O., & Tarasenko, T. (2024). Methods of real-time parametric diagnostics for marine diesel engines. *Polish Maritime Research*, 31, 71–84. <https://doi.org/10.2478/pomr-2024-0037>
11. Zalozh, V. (2024). Overview of modern trends in diagnostic systems for marine diesel engines based on working process parameters. *Transport Development*, 1(20), 44–56. <https://doi.org/10.33082/td.2024.1-20.05> [in Ukrainian].
12. Wysocki, J., & Witkowski, K. (2023). Increasing the efficiency of marine engine parametric diagnostics based on analyses of indicator diagrams and heat-release characteristics. *Energies*, 16(17), Article 6240. <https://doi.org/10.3390/en16176240>
13. Puzdrowska, B. (2025). Comparison of methods for diagnosing marine IC engines based on working medium parameters including exhaust gas specific enthalpy. *Combustion Engines*, 201(2), 3–13. <https://doi.org/10.19206/CE-195438>
14. Quartullo, R., Garulli, A., Giannitrapani, A., Minamino, R., & Vichi, G. (2023). In-cylinder pressure estimation from rotational speed measurements via extended Kalman filter. *Sensors*, 23(9), Article 4326. <https://doi.org/10.3390/s23094326>
15. Torres, N., Maciel, J., Lima, T., Gazziro, M., Filho, A., Carmo, J., & Ando Junior, O. (2025). Fault diagnosis in internal combustion engines using artificial intelligence predictive models. *Applied System Innovation*, 8(5), Article 147. <https://doi.org/10.3390/asi8050147>
16. Chen, M., Gan, H., & Wu, H. (2024). Research on fault diagnosis method for marine diesel engines based on multi-scale attention mechanism transformer. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(12), Article 2348. <https://doi.org/10.3390/jmse12122348>

Дата першого надходження рукопису до видання: 24.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 14.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025