УДК 621.65:629.5.038 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.36

В. І. ХОЛДЕНКО
старший викладач кафедри суднових енергетичних установок
та технічної експлуатації
Навчально-науковий інститут морського флоту
Одеського національного морського університету
ORCID: 0000-0003-0071-7055

ОЦІНКА ВПЛИВУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ЗНОС ДЕТАЛЕЙ СУДНОВОГО НАСОСНОГО ОБЛАДНАННЯ

Інтенсивне зношування суднового насосного обладнання в умовах морського середовища, зумовлене дією вібраційних, гідродинамічних, термічних та інерційних навантажень у поєднанні з обмеженим доступом до обслуговування під час рейсів, створює значні ризики для функціональної надійності допоміжних систем, що зумовлює високу актуальність дослідження закономірностей деградації деталей і розроблення ефективних технічних рішень для забезпечення довговічної експлуатації суднових установок. Метою дослідження є комплексна оцінка основних експлуатаційних навантажень, що діють на вузли насосного обладнання суден, виявлення факторів, які пришвидшують знос, та обґрунтування шляхів підвищення ресурсу і надійності насосних систем. У роботі застосовано методи структурного аналізу конструктивних вузлів насосів, спектральний аналіз вібрацій, критичне узагальнення даних вібро-, теплових і гідродинамічних навантажень, а також ризик-орієнтовані підходи до оцінки зносу. Здійснено порівняння впливу різних експлуатаційних режимів на характер деградації деталей. У результаті виконання дослідження систематизовано основні групи навантажень, які критично впливають на довговічність насосного обладнання. Показано, що інтенсивність зносу найбільше зростає під впливом вібраційного розбалансу, кавітації та високих локальних температур. Встановлено ключові точки прискореного зношування – підшипники, ущільнення, лопаті, вали. Обґрунтовано доцільність впровадження систем вібродіагностики, аналізу мастильного середовища, частотного керування приводами та вдосконалення конструкцій деталей. Сформульовано практичні рекомендації щодо впровадження систем віброконтролю, моніторингу стану мастила та використання принципів FMEA-аналізу для обґрунтування переходу до стан-орієнтованої стратегії технічного обслуговування насосного обладнання. Наукова новизна полягає у системному підході до типологізації експлуатаційних навантажень та визначенні їхньої ролі у формуванні зношування на мікрорівні. Практична цінність полягає у формуванні прикладних рекомендацій для підвищення технічного ресурсу насосів без конструктивного втручання, що може бути впроваджено на існуючому флоті.

Ключові слова: *вібраційні навантаження, кавітація, знос вузлів, технічна діагностика, ресурс обладнання, насосні системи, морське середовище.*

V. I. KHOLDENKO
Senior Lector at the Ship Power Plants and Technical Operation Department
Merchant Marine Institute of Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0003-0071-7055

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF OPERATING LOADS ON THE WEAR OF PARTS OF SHIP PUMPING EQUIPMENT

Intensive wear of ship pumping equipment in the marine environment, caused by the action of vibration, hydrodynamic, thermal and inertial loads in combination with limited access to maintenance during voyages, creates significant risks for the functional reliability of auxiliary systems, which makes it highly relevant to study the patterns of degradation of parts and develop effective technical solutions to ensure long-term operation of ship installations. The purpose of the study is a comprehensive assessment of the main operational loads acting on the components of the pumping equipment of ships, identifying factors that accelerate wear, and substantiating ways to increase the resource and reliability of pumping systems. The work uses methods of structural analysis of pump components, spectral analysis of vibrations, critical generalization of vibration, thermal and hydrodynamic load data, as well as risk-based approaches to wear assessment. The impact of different operating modes on the nature of the degradation of parts is compared. As a result of the study, the main groups of loads that critically affect the durability of pumping equipment were systematized. It was shown that the intensity of wear increases most under the influence of vibration imbalance, cavitation and high local temperatures. Key points of accelerated wear were established - bearings, seals, blades, shafts. The feasibility of implementing vibration diagnostics systems, lubricant analysis, frequency control of drives and improving the designs of parts was substantiated. Practical recommendations were formulated for the implementation of vibration control systems, lubricant condition

© Холденко В. І., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

monitoring and the use of FMEA analysis principles to justify the transition to a condition-oriented strategy for technical maintenance of pumping equipment. The scientific novelty lies in the systematic approach to the typology of operational loads and the determination of their role in the formation of wear at the micro level. The practical value lies in the formation of applied recommendations for increasing the technical resource of pumps without constructive intervention, which can be implemented in the existing fleet.

Key words: *vibration loads, cavitation, wear of components, technical diagnostics, equipment life, pumping systems, marine environment.*

Постановка проблеми

Надійність і довговічність суднового насосного обладнання є критичними чинниками для забезпечення стабільної роботи суднових допоміжних систем, зокрема у складних умовах морської експлуатації. Насоси відіграють ключову роль у забезпеченні життєдіяльності судна, включаючи системи охолодження, змащування, осушення та подачі палива. Водночас тривала дія експлуатаційних навантажень, зокрема гідродинамічних імпульсів, вібрацій, термомеханічних деформацій, а також забруднення мастильного середовища, що призводить до інтенсивного зношування деталей насосів, що ставить під загрозу функціонування всієї технічної системи судна.

Сучасні дослідження свідчать про високий рівень впливу вібраційних навантажень на зниження залишкового ресурсу механізмів. Зокрема, дослідники акцентують увагу на критичних граничних рівнях вібрації, перевищення яких істотно прискорює розвиток дефектів і зменшує міжремонтний період експлуатації обладнання [1, с. 127–128]. Водночас, окрім механічних чинників, значну роль у прискоренні зносу відіграють зміни у властивостях мастильного середовища. Використання дистилятних палив із недостатніми змащувальними характеристиками унеможливлює ефективне запобігання фрикційному зносу в насосних парах тертя [2, с. 128–130]. Подібні висновки підтверджуються дослідженнями іноземних науковців. Наприклад, К. Ян (K. Yang) та Т. Чжан (T. Zhang) дослідили вплив нестабільного режиму змащування на знос у суднових підшипниках, підкреслюючи необхідність ретельного аналізу мастил у динамічних умовах [3].

Таким чином, науково-практична проблема полягає в необхідності комплексної оцінки впливу експлуатаційних навантажень на знос деталей суднового насосного обладнання, що передбачає синтез механічних, гідравлічних і трибологічних аспектів. Вирішення цього завдання дозволить суттєво підвищити надійність насосних систем, оптимізувати регламент обслуговування та знизити експлуатаційні витрати.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика зносу деталей суднового насосного обладнання є предметом міждисциплінарних досліджень, що охоплюють механіку, гідравліку, трибологію, вібраційну діагностику та матеріалознавство. Передусім слід відзначити фундаментальні розробки в галузі вібродіагностики суднового обладнання. Так, О. Мельник та В. Сорока розробили комплексну методику оцінки технічного стану головної енергетичної установки на основі аналізу вібраційних характеристик, що дозволяє своєчасно виявляти передумови до зносу та зниження ресурсу агрегатів [4].

Серед міжнародних праць заслуговує уваги дослідження М. Парк (M. Park) зі співавторами, де розглянуто сучасні методи зниження вібрацій у морських установках, зокрема демпфування, ізоляцію джерел шуму та конструктивне вдосконалення [5]. Хоча основна увага приділена двигунам, отримані висновки можуть бути адаптовані й до насосного обладнання. Вагомі результати також подано у роботі В. Цао (W. Cao), Х. Ванга (H. Wang) та Дж. Танга (J. Tang), які за допомогою CFD–DEM моделювання довели, що ерозія та кавітація деформують напрямні лопатки відцентрових насосів уже на ранніх етапах експлуатації [6]. У питанні вибору матеріалів для підвищення зносостійкості насосних вузлів, Х. Ванга (H. Wang) зі співавторами звертають увагу на комбінацію поверхневого зміцнення, модифікації фрикційних пар та альтернативних мастил, пропонуючи перспективні підходи для покращення ресурсу аксіальних поршневих насосів [7]. Особливу увагу варто приділити дослідженням з аналізу якості мастильного середовища: С. Сагін, С. Бондар і Т. Столярик у своєму дослідженні встановили зв’язок між показниками моторного мастила та безвідмовністю дизельних агрегатів, наголошуючи на діагностичному потенціалі аналізу оливи [8].

Серед прикладних досліджень варто відзначити роботу В. Чимшира, де розглядається експлуатація транспортних систем, зокрема насосів, з акцентом на оптимізацію технічного обслуговування та енергоефективність, хоча питання зношування висвітлено побіжно [9]. Натомість А. Кононенко та В. Слабко підкреслюють роль безперервної освіти у формуванні фахових навичок суднових механіків, що прямо впливає на якість догляду за насосами в складних умовах [10].

Щодо ризик-орієнтованих підходів, Б. Цейлан (B. Ceylan) зі співавторами пропонують застосування методу FMEA та ERS для оцінки впливу обростання морських систем на технічну справність обладнання, включаючи насоси – це дослідження розкриває важливість системного аналізу ризиків в умовах морського середовища [11]. Праця В. Шеня (W. Shen) зі співавторами фокусуються на моделюванні ризиків пошкодження трубопроводів та обладнання під час стоянки танкерів біля причалу, акцентуючи на важливості динамічної оцінки експлуатаційного навантаження у прикордонних режимах [12]. Хоча насосне обладнання не є основним об’єктом

розгляду, підхід до аналізу лінійної відмови може бути адаптований до оцінки вразливості насосних систем у подібних умовах.

Автори Х. Гаріб (H. Gharib) та Г. Ковач (G. Kovacs), що порівнюють надійність морських та промислових дизельних двигунів, непрямо підтверджують більшу вразливість морських агрегатів до дії змінного навантаження та корозійних чинників, що може бути екстрапольовано й на насосне обладнання [13]. Варто відзначити, що Г. Коцак (G. Kocak) зі співавторами демонструють, як інтелектуальні методи здатні ідентифікувати дефекти ще до їх прояву в традиційних індикаторах, однак акцент зроблено переважно на дизелях, що обмежує застосування підходу до насосів [14].

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є комплексна оцінка впливу експлуатаційних навантажень на процеси зношування основних деталей суднового насосного обладнання, з урахуванням характеру вібраційних, гідродинамічних і трибологічних факторів в умовах морської експлуатації. Для досягнення поставленої мети у дослідженні визначено такі завдання:

1. Дослідити характер експлуатаційних навантажень, що виникають у роботі суднових насосів, із виокремленням критичних параметрів, які мають найбільший вплив на знос елементів насосного обладнання.
2. Проаналізувати закономірності розвитку зношування деталей насосних агрегатів під дією вібраційних, гідродинамічних та теплових навантажень, а також властивостей мастильного середовища.
3. Виявити напрямки підвищення надійності та ресурсу суднового насосного обладнання шляхом формування рекомендацій щодо оптимізації режимів експлуатації, діагностики стану та покращення умов змащування.

Викладення основного матеріалу дослідження

Основними видами навантажень, що діють на деталі суднових насосів у процесі експлуатації, є механічні вібрації, гідродинамічні імпульси потоку, теплові деформації, а також вплив зовнішнього морського середовища. Вібраційні навантаження виникають через дисбаланс та пульсації від роботи двигунів і самого насоса, передаючись на корпус і вузли. Дослідження показують, що перевищення критичних рівнів вібрації різко прискорює розвиток дефектів і скорочує міжремонтний ресурс обладнання [1, с. 127–128]. Важливо відзначити, що на знос впливають не лише амплітуди коливань, а й їх спектральний склад – резонансні частоти можуть спричиняти локальні перевантаження конструкції.

Гідродинамічні навантаження виникають через пульсації тиску, гідроудари та кавітацію, що спричиняють ерозійне пошкодження лопатей і корпусу. CFD–DEM моделювання підтверджує, що поєднання кавітації та твердих часток прискорює знос поверхонь [6]. Ключовими чинниками гідравлічного навантаження є низький тиск на вході (NPSH) і вміст абразивів. Теплові навантаження зумовлені перепадами температур через часті пуски чи гарячі рідини, що викликає деформації і додаткове тертя. Стабілізація температурного режиму, зокрема шляхом регулювання обертів вентиляторів, зменшує тепловий стрес [15, с. 253–255]. Зовнішні чинники, такі як морська качка та заростання захисних решіток у водозабірних камерах (sea chest) суден, викликають інерційні навантаження і провокують кавітацію. Це впливає на справність насосів і має враховуватись у розрахунках надійності [11, с. 416–418]. Додаткові пікові навантаження можливі при стоянці суден – хвильова дія змінює тиск у трубопроводах. Як показано в [12], аналіз динамічних режимів корисний і для оцінки роботи насосів в екстремальних умовах.

Отже, до критичних параметрів експлуатаційних впливів, що найбільше впливають на інтенсивність зношування насосів, належать рівні вібрації та їх частотний спектр, наявність кавітації і твердих домішок у робочій рідині різкі перепади навантаження при нестаціонарних режимах, а також фактори середовища (корозійність морської води, обростання). Для наочного узагальнення ці фактори сформовано у табл. 1.

Процеси зношування деталей насосного обладнання мають комплексний характер і зумовлені дією вібрацій, гідродинамічних, термічних і корозійних навантажень. Вібраційна втома призводить до зародження мікротріщин у зонах підвищених напружень, що згодом об'єднуються, спричиняючи пошкодження елементів конструкції [1, с. 127–128]. Ерозійно-абразивний знос виникає при наявності твердих часток у рідині, які викликають вибивання металу на передніх крайках лопаток і внутрішніх стінках корпусу [6]. Кавітація спричиняє точкові руйнування поверхонь через схлопування бульбашок, що порушує профіль лопаток і знижує продуктивність насоса.

Теплові навантаження викликають термомеханічну втому, зокрема тріщиноутворення у зонах локального нагріву, таких як підшипники ковзання. Адгезійне зношування спостерігається у парах тертя при нестабільному мастильному режимі – на поверхнях утворюються задири та сліди граничного тертя [2, с. 128–130; 3]. Згідно з дослідженням [8], вміст металевих часток у мастилі прямо корелює з інтенсивністю зносу. Додатковий ризик становить корозійна деградація у морському середовищі, що підсилює втомне та абразивне зношування [13, с. 327–330]. Таким чином, одночасна дія кількох факторів зумовлює поступове накопичення пошкоджень, що можна діагностувати на ранніх стадіях за допомогою аналізу мастил або віброконтролю. Для систематизації основних механізмів зношування та відповідних причинних факторів їх наведено у табл. 2.

Підвищення довговічності суднових насосів потребує комплексного підходу, що включає оптимізацію режимів роботи, удосконалення систем діагностики, поліпшення умов змащування, а також використання сучасних

Таблиця 1

Основні експлуатаційні навантаження на насосне обладнання та критичні параметри їх впливу

Вид навантаження	Характер впливу на насос	Критичні параметри (граничні значення)
Вібраційні навантаження	Періодичні коливання корпусу і вузлів насоса від обертання валу, дисбалансу або передавані від двигуна. Спричиняють циклічні напруження в матеріалах	Амплітуда віброприскорення чи швидкості понад норму (перевищення порогів ISO); резонансні частоти, що збігаються з власними частотами конструкції
Гідродинамічні імпульси	Різкі коливання тиску і витрати в проточній частині насоса (пульсації, гідроудари). Викликають ударні навантаження на лопаті, корпус і трубопроводи	Стрімке збільшення тиску (гідроудар > 10–1510–15 МПа у системах охолодження); амплітуда тискових пульсацій; швидкість закриття клапанів
Кавітація потоку	Утворення парових бульбашок при зниженні тиску на вході та їх схлопування з ударним ефектом. Призводить до ерозії металу деталей насоса	Зниження тиску на всмоктуванні нижче критичного NPSH; інтенсивність кавітації (кількість схлопувань за секунду). Довготривала кавітація неприпустима
Теплові навантаження	Нагрівання і охолодження деталей насоса при роботі (особливо на гарячих рідинах) спричиняє температурні деформації, зміну зазорів	Температура перекачуваної рідини (°C) – перевищення робочого діапазону; градієнт температур між вузлами; кількість теплових циклів «пуск-стоп»
Зовнішні фактори середовища	Морська хитавиця та удари корпусу спричиняють додаткові динамічні навантаження; солона вода і біологічне обростання викликають корозію та утруднення подачі	Амплітуда кутових коливань судна (°) і прискорення, що діє на агрегат; ступінь обростання забірних ґрат (% площі); концентрація солей і агресивність середовища (pH, хлориди)

Джерело: сформовано автором на основі даних [1, с. 127–128; 6; 11, с. 416–418; 12; 15, с. 253–255]

Таблиця 2

Основні механізми зношування деталей насосів та чинники, що їх обумовлюють

Вид зношування (механізм)	Причинні експлуатаційні фактори	Характерні прояви та наслідки зносу
Втомне руйнування матеріалу	Циклічні механічні навантаження: вібрації, пульсації тиску, удари; часті пуски/зупинки насоса.	Мікротріщини, що ростуть. Ризик раптового руйнування лопаток, вала, корпусу
Абразивно-ерозійний знос	Тверді частки у перекачуваній рідині (піщинки, окалина); кавітаційні явища при низькому тиску на вході; забруднення мастила твердими домішками	Втрата матеріалу на лопатках і корпусі, каверни, зниження ККД через шорсткість.
Адгезійний (фрикційний) знос	Недостатнє змащування пар тертя: низька якість палива/оливи, зниження рівня чи тиску мастила; перегрів вузлів; робота «на суху»	Задири, подряпини, перегрів, потемніння оливи, зростання зазорів, ризик заклинювання
Корозійне спрацювання	Агресивне середовище: дія морської води, електрохімічна корозія в присутності струмів; високотемпературна корозія при нагрітій рідині	Виїмки, рівномірне тонке спрацювання, ослаблення міцності, поєднання з вібраціями

Джерело: сформовано автором на основі даних [1, с. 127–128; 2, с. 128–130; 3; 6; 8; 13, с. 327–330]

матеріалів і конструкцій. Одним із ключових напрямів є зниження шкідливих навантажень: балансування ротора, центрування агрегатів, встановлення демпфуючих елементів дозволяє зменшити вібрації. Впровадження частотно-регульованих приводів запобігає гідроударам і кавітації, сприяючи стабільній роботі насосів. Діагностика технічного стану, зокрема віброконтроль і аналіз мастильного середовища, дає змогу виявити ознаки зносу ще до появи відмов. Застосування інтелектуальних методів, описаних у [14], дозволяє будувати системи прогнозування на основі сенсорних даних. Ризик-орієнтовані стратегії техобслуговування (FMEA) дозволяють зосередити контроль на найбільш уразливих елементах.

Не менш важливим є забезпечення ефективного змащування: використання якісних мастильних матеріалів і регулярний аналіз їх стану дозволяє мінімізувати адгезійний знос. Технічні рішення включають нанесення зносостійких покриттів, підбір матеріалів пар тертя, а також оптимізацію конструкції насосів задля зменшення кавітації та вібрацій [7]. Високу роль відіграє підготовка персоналу: кваліфіковані механіки здатні рано виявити аномалії в роботі обладнання, запобігаючи серйозним відмовам. Освітні програми та інструктажі з правил експлуатації і діагностики є невід'ємним чинником надійності насосних систем.

В сукупності запропоновані заходи забезпечують синергетичний ефект, дозволяючи мінімізувати вплив експлуатаційних навантажень на вузли насосів і реалізувати їх потенційний ресурс повною мірою.

Висновки

У результаті проведеного дослідження отримано обґрунтовані висновки, які відображають комплексне розуміння характеру експлуатаційних навантажень, механізмів зношування деталей насосного обладнання та дозволяють сформулювати технічно доцільні підходи до підвищення його надійності й ресурсу. По-перше, в результаті виконання першого завдання систематизовано експлуатаційні навантаження, які чинять критичний вплив на вузли насосного обладнання: до них віднесено вібраційні коливання, динаміку гідравлічних параметрів, перепади температури, а також властивості мастильного середовища, що безпосередньо впливають на інтенсивність зносу. По-друге, у межах другого завдання досліджено основні закономірності формування пошкоджень у тертьових парах, зокрема розвиток втомних тріщин, кавітаційного руйнування, задирів та абразивного спрацювання. На основі аналізу практичних випадків виявлено, що нестабільні режими роботи, недостатній контроль мастила та

вплив гідродинамічних навантажень є основними причинами передчасного зношування. По-третє, при виконанні третього завдання розроблено і обґрунтовано комплекс технічних і організаційних заходів щодо підвищення надійності насосів, до яких належать: впровадження вібраційної та мастильної діагностики, застосування антивібраційних рішень, оптимізація режимів експлуатації, використання зносостійких матеріалів та вдосконалення систем обслуговування на основі технічного стану.

Отримані результати мають значну практичну цінність для впровадження в експлуатаційну практику морського транспорту, зокрема в системах технічного менеджменту допоміжного обладнання. Наукова новизна роботи полягає в комплексному аналізі сукупної дії навантажувальних чинників на динаміку зношування насосів та узагальненні ефективних засобів його мінімізації. Перспективами подальших досліджень є створення цифрових моделей прогнозування ресурсу насосного обладнання, розробка інтелектуальних систем діагностики та адаптивного управління режимами роботи насосів на основі аналізу сенсорних даних у реальному часі.

Список використаної літератури

1. Свиридов В., Андреєв А., Андрєєв А. Аналіз впливу граничних рівнів вібрації на залишковий ресурс суднових машин і механізмів. *Розвиток транспорту*. 2023. № 4 (19). С. 125–139. URL: https://doi.org/10.33082/td.2023.4-19.10 (дата звернення: 15.06.2025).

2. Сорока В., Мельник О., Довгаль І. Математична модель оцінювання змащувальної здатності суднових дистилятних палив. *Водний транспорт*. 2023. № 2 (36). С. 120–134. URL: https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.36.10 (дата звернення: 15.06.2025).

3. Yang K., Zhang T. Lubrication analysis of stern bearing during ship severe turning maneuver. *Wear*. 2023. Vol. 523. Article 204734. URL: https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204734 (дата звернення: 15.06.2025).

4. Мельник О., Сорока В. Вібродіагностика головної енергетичної установки суден: вдосконалення та інтеграція методів. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2023. № 47. С. 349–359. URL: https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300121 (дата звернення: 15.06.2025).

5. Review of noise and vibration reduction technologies in marine machinery: Operational insights and engineering experience / M. Park et al. *Applied Ocean Research*. 2024. Vol. 152. Article 104195. URL: https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104195 (дата звернення: 15.06.2025).

6. Cao W., Wang H., Tang J. Study on wear characteristics of a guide vane centrifugal pump based on CFD–DEM. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12. No. 4. Article 593. URL: https://doi.org/10.3390/jmse12040593 (дата звернення: 15.06.2025).

7. Structural improvement, material selection and surface treatment for improved tribological performance of friction pairs in axial piston pumps: A review / H. Wang et al. *Tribology International*. 2024. Vol. 198. Article 109838. URL: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109838 (дата звернення: 15.06.2025).

8. Сагін С., Бондар С., Столярик Т. Оцінка безвідмовності суднових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення. *Водний транспорт*. 2023. № 1 (37). С. 59–70. URL: http://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06 (дата звернення: 15.06.2025).

9. Чимшир В. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту: колективна монографія. *Ізмаїл: Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»*. 2020. 472 с. URL: https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2021/04/monografia2020.pdf (дата звернення: 15.06.2025).

10. Кононенко А., Слабко В. Реалізація неперервної освіти в процесі формування професійної компетентності майбутніх суднових механіків. *Науковий часопис. Серія 5. Педагогічні науки: реалії та перспективи*. 2024. № 101. С. 20–25. URL: https://doi.org/10.31392/UDU-nc.series5.2024.101.04 (дата звернення: 15.06.2025).

11. Risk assessment of sea chest fouling on the ship machinery systems by using both FMEA method and ERS process / B. Ceylan et al. *Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs*. 2023. Vol. 15. No. 4. P. 414–433. URL: https://doi.org/10.1080/18366503.2022.2104494 (дата звернення: 15.06.2025).

12. Operability analysis and line failure risk assessment for a tanker moored at berth / W. Shen et al. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 300. Article 117439. URL: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117439 (дата звернення: 15.06.2025).

13. Gharib H., Kovacs G. Reliability analysis of marine diesel engines vs. industrial diesel engines: a comparative approach. *Acta Logistica*. 2024. Vol. 11. No. 2. P. 325–337. URL: https://doi.org/10.22306/al.v11i2.516 (дата звернення: 15.06.2025).

14. Kocak G., Gokcek V., Genc Y. Condition monitoring and fault diagnosis of a marine diesel engine with machine learning techniques. *Pomorstvo*. 2023. Vol. 37. No. 1. P. 32–46. URL: https://doi.org/10.31217/p.37.1.4 (дата звернення: 15.06.2025).

15. İnal Ö., Koçak G. A case study on the variable frequency drive for ship engine room ventilation. *Marine Science and Technology Bulletin*. 2023. Vol. 12. No. 3. P. 252–258. URL: https://doi.org/10.33714/masteb.1299692 (дата звернення: 15.06.2025).

References

1. Svyrydov, V., Andreev, A., & Andriiev, A. (2023). Analiz vplyvu hranichnykh rivniv vibratsii na zalyshkovyi resurs sudnovykh mashyn i mekhanizmiv. [Analysis of the impact of limit vibration levels on the residual life of ship machinery and mechanisms]. *Rozvytok transportu – Transport Development*, 4(19), 125–139. Retrieved from https://doi.org/10.33082/td.2023.4-19.10 [in Ukrainian].

2. Soroka, V., Melnyk, O., & Dovhal, I. (2023). Matematychna model otsiniuvannia zmashchuvalnoi zdatnosti sudnovykh dystyliatnykh palyv. [Mathematical model for assessing the lubricating ability of marine distillate fuels]. *Vodnyi transport – Water Transport*, 2(36), 120–134. Retrieved from https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.36.10 [in Ukrainian].

3. Yang, K., & Zhang, T. (2023). Lubrication analysis of stern bearing during ship severe turning maneuver. *Wear*, 523, Article 204734. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204734 [in English].

4. Melnyk, O., & Soroka, V. (2023). Vibrodiahnostyka holovnoi enerhetychnoi ustanovky suden: vdoskonalennia ta intehratsiia metodiv. [Vibration diagnostics of ship main power plants: improvement and integration of methods]. *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Seriia: Tekhnichni nauky – Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Technical Sciences*, 47, 349–359. https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300121 [in Ukrainian].

5. Park, M., Yeo, S., Choi, J., & Lee, W. (2024). Review of noise and vibration reduction technologies in marine machinery: Operational insights and engineering experience. *Applied Ocean Research*, 152, Article 104195. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104195 [in English].

6. Cao, W., Wang, H., & Tang, J. (2024). Study on wear characteristics of a guide vane centrifugal pump based on CFD–DEM. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(4), Article 593. Retrieved from https://doi.org/10.3390/jmse12040593 [in English].

7. Wang, H., Lin, N., Yuan, S., Liu, Z., Yu, Y., Zeng, Q., Fan, J., Li, D., & Wu, Y. (2024). Structural improvement, material selection and surface treatment for improved tribological performance of friction pairs in axial piston pumps: A review. *Tribology International*, 198, Article 109838. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109838 [in English].

8. Sahin, S., Bondar, S., & Stolyaryk, T. (2023). Otsinka bezvidmovnosti sudnovykh dyzeliv za tekhnichnym stanom mastyla tsyrkuliatsiinykh system mashchennia. [Assessment of the reliability of marine diesel engines based on the condition of lubricating oil in circulation systems]. *Vodnyi transport – Water Transport*, 1(37), 59–70. Retrieved from https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06 [in Ukrainian].

9. Chymshyr, V. (2020). Suchasni pidkhody do vysokoeffektyvnoho vykorystannia zasobiv transportu: kolektyvna monohrafiia. [Modern approaches to the efficient use of transport means: Collective monograph]. *Izmail: Dunaiskyi Instytut Natsionalnoho Universytetu «Odeska Morska Akademiia» – Izmail: Danube Institute of the National University "Odesa Maritime Academy"*, Article 472. Retrieved from https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2021/04/monografia2020.pdf [in Ukrainian].

10. Kononenko, A., & Slabko, V. (2024). Realizatsiia neperervnoi osvity v protsesi formuvannia profesiinoi kompetentnosti maibutnikh sudnovykh mekhanikiv. [Implementation of lifelong learning in the process of forming professional competence of future marine engineers]. *Naukovyi chasopys. Seriia 5. Pedahohichni nauky: realii ta perspektyvy – Scientific Bulletin. Series 5. Pedagogical Sciences: Realities and Prospects*, 101, 20–25. Retrieved from https://doi.org/10.31392/UDU-nc.series5.2024.101.04 [in Ukrainian].

11. Ceylan, B., Karatuğ, Ç., Ejder, E., Uyanık, T., & Arslanoğlu, Y. (2023). Risk assessment of sea chest fouling on the ship machinery systems by using both FMEA method and ERS process. *Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs*, 15(4), 414–433. Retrieved from https://doi.org/10.1080/18366503.2022.2104494 [in English].

12. Shen, W., Hu, J., Liu, L., & Chen, H. (2024). Operability analysis and line failure risk assessment for a tanker moored at berth. *Ocean Engineering*, 300, Article 117439. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117439 [in English].

13. Gharib, H., & Kovacs, G. (2024). Reliability analysis of marine diesel engines vs. industrial diesel engines: A comparative approach. *Acta Logistica*, 11(2), 325–337. Retrieved from https://doi.org/10.22306/al.v11i2.516 [in English].

14. Kocak, G., Gokcek, V., & Genc, Y. (2023). Condition monitoring and fault diagnosis of a marine diesel engine with machine learning techniques. *Pomorstvo*, 37(1), 32–46. Retrieved from https://doi.org/10.31217/p.37.1.4 [in English].

15. İnal, Ö., & Koçak, G. (2023). A case study on the variable frequency drive for ship engine room ventilation. *Marine Science and Technology Bulletin*, 12(3), 252–258. Retrieved from https://doi.org/10.33714/masteb.1299692 [in English].

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025