

УДК 621.431
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2023.4\(493\).1](https://doi.org/10.15589/znp2023.4(493).1)

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF PROPELLER ROUGHNESS ON MARINE FUEL CONSUMPTION

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ШОРСТКОСТІ ГРЕБНОГО ГВИНТА НА ВИТРАТИ СУДНОВОГО ПАЛИВА

Nadiia I. Aleksandrovska
a.nadegda@gmail.com
ORCID: 0000-0001-6591-2068

Liudmyla V. Pizintsali
lvpizintsali@gmail.com
ORCID: 0000-0002-8046-0917

Olena I. Rossomakha
eirossomakha@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4425-2192

Oleh A. Rossomakha
roleg.post@gmail.com
ORCID: 0000-0002-0230-9453

Н. І. Александровська,
канд. техн. наук, доцент

Л. В. Пізінцалі,
канд. техн. наук, доцент

О. І. Россомаха,
канд. техн. наук, доцент

О. А. Россомаха,
доцент

*Educational and Scientific Marine Engineering and Technical Institute
Merchant Marine Institute
Odesa National Maritime University, Odesa*

*Навчально-науковий морський інженерно-технічний інститут
Навчально-науковий інститут морського флоту
Одеський національний морський університет, м. Одеса*

Abstract. *Introduction.* The relevance of scientific research is determined by the strengthening of requirements for emissions into the atmosphere of harmful substances contained in the exhaust gases of the main ship engines and the impact of roughness on the cost and consumption of ship fuel. The international convention MARPOL 73/78, adopted by the International Maritime Organization (IMO), is the main document containing a number of measures to prevent pollution of the marine environment from ships. *Purpose.* The relevance of scientific research is determined by the strengthening of requirements for emissions into the atmosphere of harmful substances contained in the exhaust gases of the main ship engines and the impact of roughness on the cost and consumption of ship fuel. The international convention MARPOL 73/78, adopted by the International Maritime Organization (IMO), is the main document containing a number of measures to prevent pollution of the marine environment from ships. In the field of energy efficiency and the cost of energy used on ships, not so many scientific works have been conducted recently by various research organizations and universities. *Method.* As an analytical tool, the authors used the Ishikawa diagram, which became an excellent means of visualization and organization of knowledge, which simplified the understanding and diagnosis of the problem. *Results.* The results of the study showed that the ways to reduce the cost of the ship's fuel economy, combat harmful emissions into the atmosphere, and significantly reduce operating fuel costs depend on many factors. The Ishikawa diagram made it possible to identify key interrelationships between various factors and to more accurately understand the researched process; contributed to the identification of the main factors that have the most significant impact on the development of the considered problem, as well as prevention or elimination of the effect of these factors. *Scientific novelty.* The team of authors determined that, first of all, fuel consumption is influenced by the parameters of the roughness of the surfaces of the propeller and conducted an analysis of this influence. *Practical importance.* The article is devoted to the analysis of the effect of propeller roughness on ship fuel consumption. The authors analyzed the impact of propeller manufacturing materials on its roughness and ship fuel consumption. In order to review the action of possible factors and to separate the most important causes, the action of which produces specific consequences and is subject to management, the authors used the construction of Ishikawa diagrams as an analytical tool. **Key words:** roughness; roughness parameters; propeller; ship life cycle; materials; ship fuel consumption; Ishikawa diagram.

Анотація. *Вступ.* Актуальність наукового дослідження визначена посиленням вимог до викидів в атмосферу шкідливих речовин, що містяться у вихлопних газах головних суднових двигунів та впливу шорсткості на вартість та витрати суднового палива. Міжнародна конвенція МАРПОЛ 73/78, прийнята Міжнародною морською організацією (ІМО), є основним документом, що містить низку заходів щодо запобігання забрудненню морського середовища з суден. *Мета.* Актуальність наукового дослідження визначена посиленням вимог до викидів в атмосферу шкідливих речовин, що містяться у вихлопних газах головних суднових двигунів та впливу шорсткості на вартість та витрати суднового палива. Міжнародна конвенція МАРПОЛ 73/78, прийнята Міжнародною морською організацією (ІМО), є основним документом, що містить низку заходів щодо запобігання забрудненню морського середовища з суден. В області енергоефективності та вартості використаної енергії на судах було проведено за останній час не так багато наукових робіт, виконаних різними дослідницькими організаціями та університетами. *Методика.* У якості аналітичного інструменту автори використовували діаграму Ісікави, яка стала чудовим засобом візуалізації і організації знань, що спростила розуміння і діагностику проблеми. *Результати.* Результати дослідження показали, що шляхи зниження вартості ЖЦ судна, боротьби з шкідливими викидами у атмосферу та значного зниження експлуатаційних витрат палива залежить від багатьох факторів. Діаграма Ісікави дозволила виявити ключові взаємозв'язки між різними факторами й більш точно зрозуміти досліджуваний процес; сприяла визначенню головних факторів, що роблять найбільш значний вплив на розвиток розглянутої проблеми, а також попередженню або усуненню дії цих факторів. *Наукова новизна.* Колектив авторів визначив, що перш за все, на витрати палива впливають параметри шорсткості поверхонь гребного гвинта та провів аналіз цього впливу.

Практична значимість. Статтю присвячено аналізу впливу шорсткості гребного гвинта на витрати суднового палива. Автори провели аналіз впливу матеріалів виготовлення гребного гвинта на його шорсткість та витрати суднового палива.

Для перегляду дії можливих факторів та відокремлення найважливіших причин, дія яких породжує конкретні наслідки та піддається управлінню, автори як аналітичний інструмент використовували побудову діаграм Ісікави.

Ключові слова: шорсткість; параметри шорсткості; гребний гвинт; життєвий цикл судна; матеріали; витрати суднового палива; діаграма Ісікави.

ВСТУП

Актуальність наукового дослідження визначена посиленням вимог до викидів в атмосферу шкідливих речовин при роботі головних суднових двигунів. Міжнародна конвенція МАРПОЛ 73/78, прийнята Міжнародною морською організацією (ІМО), є основним документом, що містить низку заходів щодо запобігання забрудненню морського середовища з суден [1].

Екологічні проблеми та зростання цін на паливо ведуть до необхідності пошуку нових рішень для судноплавства. На думку авторів, альтернатив не так багато.

Статтю присвячено питанню встановлення впливу шорсткості гребного гвинта на витрати суднового палива (шляхом виділення ризиків природно-кліматичного, фінансового, виробничого, економічного, людського, політичного та технічного характеру). У якості аналітичного інструменту автори використовували діаграму Ісікави, яка стала чудовим засобом візуалізації і організації знань, що спростила розуміння і діагностику проблеми.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Проблеми енергозбереження (економії та зниження вартості палива) завжди були актуальними. Останні десятиліття вони загострилися вимогами щодо захисту довкілля від шкідливих викидів із суден.

Тому, актуальним є аналіз різних факторів впливу на витрати суднового палива, одним з яких є вплив гребного гвинта.

Діаграма Ісікави дозволила виявити ключові взаємозв'язки між різними факторами й більш точно зрозуміти досліджуваний процес; сприяла визначенню головних факторів, що роблять найбільш значний вплив на розвиток розглянутої проблеми, а також попередженню або усуненню дії цих факторів.

Одним з негативних наслідків старіння морського транспортного судна, разом з зростанням витрат на технічне обслуговування і ремонт, є збільшення витрат палива. Ці обставини мають важливе значення для судновласника тому що витрати на паливо можуть складати до 50% від загальної суми витрат, що пов'язані з експлуатацією морських транспортних суден.

В області енергоефективності та вартості використаної енергії на судах було проведено за останній час не так багато наукових робіт, виконаних різними дослідницькими організаціями та університетами. Можна назвати деякі з них.

«Аналіз споживання палива для різних типів і розмірів суден» – дослідження, проведене Міжнародною асоціацією морського транспорту (ICS), яке аналізує споживання палива різними типами і розмірами суден. Результати роботи допомагають визначити найбільш ефективні стратегії зниження витрати палива в морському транспорті.

«Оптимізація енергоефективності судна з використанням підходів, керованих даними» – дослідження, проведене вченими Шведського королівського технологічного інституту (КТН), яке досліджує оптимізацію енергоефективності суден за допомогою методів аналізу даних. В роботі пропонуються методи прогнозування та управління споживанням палива на судах.

«Техніко-економічний аналіз паливозберігаючих технологій для суден» – наукова робота, проведена дослідниками Нідерландського інституту морської техніки (MARIN), яка проводить техніко-економічний аналіз технологій, спрямованих на зниження витрати палива на судах. У роботі розглядаються різні інноваційні рішення, такі як використання альтернативних джерел енергії та оптимізація дизельних двигунів.

Крім цього ця проблема постійно аналізується та досліджується в Міжнародній морській організації (ІМО).

За різними оцінками, витрати на паливо можуть досягати до 35...40% від загальних витрат на обслуговування суднової енергетичної установки (СЕУ) [2].

Автори, в роботі [3], зробили спробу дослідити вплив альтернативних видів палива на вартість і витрати суднового палива, вартість ЖЦ судна, а в теперішньому дослідженні, автори спробували дослідити роль впливу шорсткості гребного гвинта на вартість та витрати суднового палива.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Наведена вище проблема знаходиться в центрі уваги фахівців суднової галузі вже тривалий час.

У роботі [4] узагальнено знання із різних методів протикорозійного захисту і визначення оптимальних рішень для захисту об'єктів різних галузей (хімічної, енергетичної, комунального господарства) від корозії.

У роботі [5] дана загальна інформація з біокорозії корпусу судна та варіанти її можливого рішення. Світове судноплавство протягом свого існування намагається зменшити збитки від корозії суден, адже сьогодні витрати на усунення даних пошкоджень досягають близько 20–30% судових витрат на експлуатацію. На сьогодні найпоширенішим видом корозії є біокорозія. Усунення негативних наслідків біокорозії складається з декількох факторів, таких як: ефективність методу, універсальність, вплив на оточуючу середу. Саме поєднання цих факторів та виявлення альтернативного варіанту є ціллю роботи науковців по всьому світу в останні 20 років.

У роботі [6] об'єктом дослідження були сили тертя від шорсткості поверхні гребного гвинта та їх вплив на пропульсивні характеристики. Проведене дослідження впливу покриттів на гідродинамічний момент опору дисків, які обертаються, що дозволяє проводити оцінку впливу шорсткості покриттів на лопатях на пропульсивні характеристики гребних гвинтів.

У статті [7] проведено дослідження впливу шорсткості та хвилястості (в тому числі з урахуванням біонавантаження) на гідродинамічні характеристики судна. Для проведення досліджень створено модель корпусу судна яка включала занурену підводну частину судна і спеціальний канал, в якому моделюється потік. Біологічне забруднення (біологічне забруднення підводного корпусу) морських і річкових суден є проблемою для всіх флотів. Модель досліджувала зміну швидкості рідини під час обтікання «чиста поверхня» з шорсткістю 75, 100, 125 мікрон. Числове моделювання показало незначний вплив зміни шорсткості покриття для «чиста поверхня». Чисельне моделювання для поверхні, забрудненої біологічними забрудненнями (шорсткість 750 мікрон), виявило значний вплив на зміну у швидкості рідини вздовж корпусу. Розроблена модель може бути використана при проведенні досліджень для порівняльної оцінки енергоефективності суден.

У роботі [8], автори вказують, що ефективність пропульсивного комплексу судна (ПКС) визначають такі параметри: швидкість ходу судна, потужність головних двигунів, частота обертання гребних гвинтів, витрата палива і ін. Від цих параметрів залежать найважливіші показники комерційної та технічної експлуатації суден морського флоту. Таким чином, щоб будувати сучасні конкурентоспроможні судна на високому рівні, необхідно приділяти достатню увагу питанням підвищення ефективності експлуатації ГД та роботи РРК у складі ПКС. Залежність елементів ПКС один від одного можна визначити за ходовими характеристиками – паспортними діаграмами, які дають графічну залежність потужності, тяги і числа оборотів від швидкості ходу судна. Ходові характеристики пов'язують між собою зовнішню характеристику двигуна, криві дії гребного гвинта і опір води руху судна для різних осадок. За діаграмою ходових характеристик також вирішують задачу про відповідність гребного гвинта обраній марці ГД та корпусу судна.

У роботі [9], автори статті вказують, що нанотехнології включають в себе широкий спектр можливостей для будівництва, модернізації та ремонту суден, а також судових систем і устаткування. Застосування нанотехнологій для будівництва та ремонту суден дозволяють поліпшити маневрування та управління суден. Нанодобавки на основі оксиду цезію вже зараз додають в дизельне паливо, що дозволяє на 4–5% підвищити ККД двигуна і знизити ступінь забруднення вихлопними газами.

У роботі [10] автор вказує, що на даний час залишається актуальність використання наноструктурних добавок в технології лакофарбних матеріалів (ЛФМ) для виробництва покриттів специфічного призначення. Використання наномодифікаторів дозволяє збільшувати антикорозійні характеристики ЛФМ, а от же і збільшенню терміну служби виробів, що

покриваються. Застосування функціональних добавок наночастинок в полімерних матеріалах, має враховувати їх оптимальні концентрації, при яких досягається істотне поліпшення експлуатаційних характеристик судна без зміни їх оптичних властивостей.

Робота [11]. Це дослідження вивчало вплив рівномірно та нерівномірно розподіленого біообростання на шорсткість, на гідродинамічні характеристики, зокрема на вихрову кавітацію для наконечника. Вплив шорсткості досліджували на Еталонному гвинті, що належав дослідницькому катамарану «The Princess Royal». Результати показали, що компоненти швидкості зменшилися всередині кінчика вихрю через шорсткість, що призводить до збільшення тиску.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що питання впливу шорсткості гребного гвинта на витрати і вартість суднового палива актуальне і потребує особливої уваги.

Мета даної статті: провести аналіз впливу шорсткості гребного гвинта з різних матеріалів на витрати суднового палива.

Методами дослідження є загальнонаукові методи наукового синтезу, для ролі і значення параметрів шорсткості гребного гвинта на морських судах, системний підхід для обґрунтування впливу шорсткості на витрати і вартість суднового палива та, взагалі, на вартість ЖЦ судна.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

У загальному вигляді вартість ЖЦ судна складається з доданків, які наведено у [12]. Особливий вплив на вартість ЖЦ судна має вартість та витрати суднового палива.

Міжнародний морський флот споживає приблизно 400 млн тонн палива щорічно. Витрати на паливо

сьогодні складають 50–60% вартості витрат всього ЖЦ судна. При цьому слід мати на увазі, що для суден витрати на обслуговування, паливо та ремонти у десятки разів перевищують вартість проектування і будівництва нового зразка [12].

Енергоефективність судна характеризує енергетичні можливості технічного засобу при найменших витратах ресурсів для вироблення енергії. Для підвищення енергоефективності суден сьогодні необхідно використовувати як заходи експлуатаційного характеру, так і заходи технічного характеру.

За великих витрат палива зростає рівень забрудненості атмосфери вихлопними газами та виникає негативний вплив на експлуатаційні показники СЕУ, що в комплексі призводить до зниження показників енергоефективності.

Від ефективності використання палива в рейсі безпосередньо залежить прибуток транспортної компанії. Паливо є ресурсом, що має бути раціонально розподілений між відповідними процесами (ділянками шляху) для забезпечення максимального прибутку.

Для виявлення факторів впливу на шорсткість автори побудували діаграму Ісікави (рис. 1).

На думку авторів основними факторами впливу є:

- гвинтові системи;
- тип судна;
- особливості роботи механізмів, систем і пристроїв;
- особливості збирання корпусу;
- матеріали обшивки та особливості обробки її поверхні;
- способи та технології фарбування корпусу;
- нерівності фарбування корпусу після побудови або ремонту;
- корозія та біологічне обростання корпусу судна.

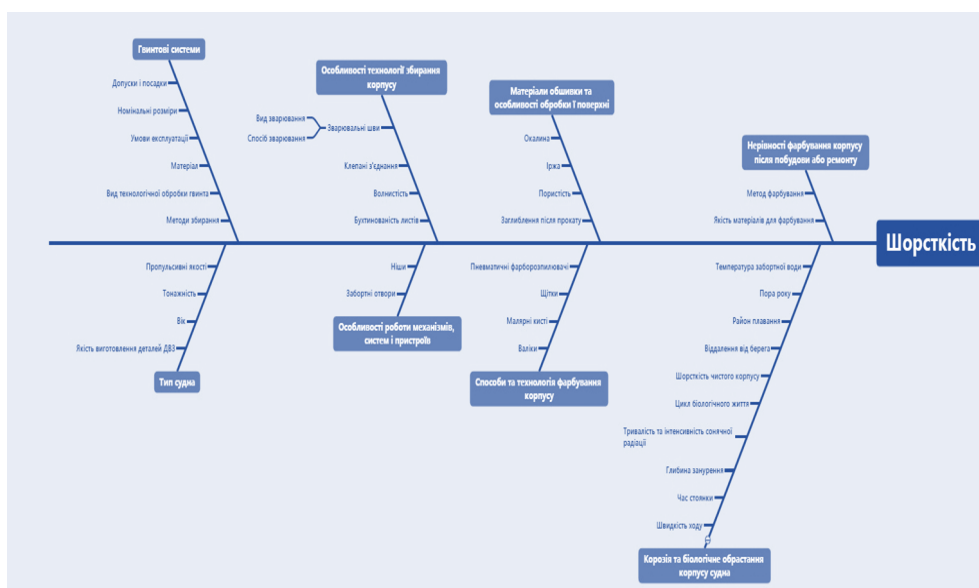


Рис. 1. Причинно-наслідкова діаграма Ісікави (розроблено авторами)

При аналізі діаграми Ісікави було застосовано класичний спосіб – метод мозкового штурму (шляхом опитування 20 експертів – капітанів, судномеханіків, колишнього головного інженера Іллічівського судноремонтного заводу (м. Чорноморськ) для встановлення основних причин впливу на вартість та витрати судового палива.

Проблеми енергозбереження (по суті, економія палива) та захисту навколишнього середовища від шкідливих викидів із суден, що були завжди актуальними, за останнє десятиліття ще більше загострилися. Це викликано нестійкістю світового нафтового ринку та посиленням вимог природоохоронних організацій, включаючи нові положення Міжнародної морської організації (ІМО).

Постійно, особливо останні десятиліття, проводяться дослідження з пошуку факторів впливу на економичність та екологічність судових палив.

Основними нормативними документами з обмеження шкідливих викидів є вимоги Міжнародної конвенції MARPOL 73/78, Додаток VI «Правила попередження забруднення повітряного середовища з суден» морської міжурядової організації ІМО [1].

Одним із компонентів пропульсивної системи судна є судовий рушій (генератори робочого тіла, двигуни, передачі, валопроводи, рушії (гребні гвинти) і т. д.

Спеціальні пристрої, що перетворюють механічну роботу судової силової установки в завзятий тиск, яке долає опори і створює поступальний рух судна називаються рушіями.

Найбільш поширеними завдяки простоті пристрою і роботи, компактності, надійності в експлуатації і найбільшому коефіцієнту корисної дії є гребні гвинти.

Останнім часом виникла необхідність продовжити вивчення питання щодо впливу шорсткості гребних гвинтів на їх пропульсивні характеристики, від яких залежать витрати судового палива.

Цьому сприяли, на думку авторів, такі обставини:

1. Введення Міжнародною морською організацією ІМО правила регулювання викидів з суден. Це неминуче приведе до контролю витрати палива для суден, що змусить більш вимогливо підходити до

кожного відсотка величини ККД гребного гвинта при його проектуванні та в процесі експлуатації.

2. Поява та активне впровадження нових технологій з використанням різних захисних покриттів лопатей (фарби, керамічні, полімерні та металополімерні покриття) та методів поверхневого зміцнення лопатей.

Автори знову скористалися побудовою діаграми Ісікави, звуживши межі аналізу впливу (рис. 2).

На думку авторів, першим важливим фактором впливу є матеріал з якого виготовляли гвинт.

З урахуванням особливостей виробництва і експлуатації гребних гвинтів матеріали для їх виготовлення повинні мати такі загальні властивості [13]:

- високі механічні властивості – міцність і пластичність, які забезпечують можливість протистояти втомним навантаженням, що сприймають лопаті;
- підвищена корозійна і ерозійна стійкість та здатність зберігати первинну чистоту поверхні тривалий час;
- кавітаційна стійкість, яка забезпечує опір руйнуванню при дії гідравлічних ударів;
- високі технологічні і задовільні ливарні властивості;
- ремонтпридатність – здатність легко піддаватися правці, заварюванню, наплавленню і т. д.
- гребні гвинти відрізняються різноманітністю форм, маси та марок матеріалів.

Відповідно до ГОСТ 8054-81 для виготовлення гребних гвинтів, в залежності від призначення судна, рекомендується застосовувати матеріали, що вказано в таблиці 1.

Гребні гвинти зі звичайної вуглецевої сталі: 25Л, 30Л, 35Л, що застосовують на річних суднах, мають низьку зносостійкість, вони погано пручаються корозії і особливо кавітаційній ерозії. Вже до кінця першої навігації шорсткість їх поверхні досягає значень $Rz = 300\text{--}500\text{ мкм}$. Надалі це призводить до значних перевитрат палива і зниження швидкості судна за рахунок зростання моменту тертя і зниження коефіцієнта упору [13].

Для заміни абсолютно непридатної вуглецевої сталі у суднобудуванні поширення набули гвинти з литої неіржавої сталі марок: 08Х14НДЛ, 10Х14НДЛ, 08Х15Н4ДМЛ.



Рис. 2. Причинно-наслідкова діаграма Ісікави впливу на шорсткість гребного гвинта (розроблено авторами)

Таблиця 1. Класи, матеріал та області застосування гребних гвинтів за ГОСТ 8054-81

Клас гребного гвинта	Матеріал гребного гвинта	Області застосування
Особливий	Спеціальні сплави, спеціальні бронзи, нержавіючі сталі	Судна морські швидкохідні, внутрішнього плавання
Вищий	Спеціальні сплави, бронзи, спеціальні латуні, нержавіючі сталі	Судна морські, внутрішнього плавання, рибпромислового флоту, необмеженого району плавання
Середній	Спеціальні сплави, спеціальні бронзи, спеціальні латуні, сталі нержавіючі та вуглецеві	Судна морські, внутрішнього плавання, шлюпки зі швидкістю ходу менш ніж 15 вузлів
Звичайний	Спеціальні сплави, спеціальні бронзи, спеціальні латуні, нержавіючі сталі, вуглецеві сталі	Судна і плавучі засоби морські, для яких швидкість ходу не є визначальним параметром, судна внутрішнього плавання

В порівнянні з іншими матеріалами, гребні гвинти з неіржавих сталей мають більш високу міцність, характеризуються високими корозійновтормними властивостями, високою антикавітаційною стійкістю, що дозволяє виготовляти їх лопати меншої товщини.

Неіржава сталь має і свої недоліки. По-перше, ливарні властивості і оброблюваність неіржавих сталей нижче, ніж у латуні та бронзи. По-друге, вартість неіржавої сталі досить висока [13].

Більш придатними матеріалами для виготовлення гребних гвинтів є спеціальні сплави, зокрема латуні і бронзи. Відповідно до класифікації Міжнародної асоціації класифікаційних товариств (МАКТ) кольорові метали для виготовлення гребних гвинтів поділяють на чотири категорії з різним нижнім рівнем механічних властивостей. Це: **Cu1**–Манганова латунь Mn; **Cu2**–Нікель-манганова латунь NiMn; **Cu3**–Нікель-алюмінієва бронза NiAl; **Cu4**–Манганова алюмінієва бронза MnAl [15]. Такі відомі марки латуней ЛМцЖ 55-3-1, ЛАМцЖ 67-5-2-2, ЛАМцЖ 68-5-2-2.

В теперішній час приблизно 70% гребних гвинтів виготовляють з алюмінієвої бронзи, наприклад БрАЖН 9-4-2, БрАЖН9-4-4, БрА7Мц15ЖЗН2Ц2.

За рахунок більш високої стійкості алюмінієвих бронз проти корозії і ерозії в морській воді істотно сповільнюється процес утворення шорсткості на поверхні лопатей. Більш високий рівень міцності алюмінієвої бронзи дозволяє зменшувати товщини лопатей на 8–10%. Ці переваги забезпечують підвищення коефіцієнта корисної дії гребних гвинтів приблизно на 2%, що створює можливість істотної економії палива.

Алюмінієва бронза вирізняється відсутністю схильності до корозійного розтріскування в морській воді та на повітрі, що призводить до досягнення вищого рівня корозійної стійкості в 1,5–2,0 рази порівняно з іншими матеріалами. Тобто, при правильному розрахунку гребного гвинта на міцність і правильної технології його виготовлення, практично виключається можливість поломки лопатей через утворення зламів втоми.

Гребні гвинти внаслідок більш високої корозійної стійкості в морській воді з алюмінієвої бронзи менш

схильні до корозійних руйнувань у випадках порушень протекторного захисту.

Незважаючи на більш високу вартість виробництва (~ на 25–35%), гребні гвинти з алюмінієво-нікелевої бронзи, внаслідок більш високої стійкості і надійності, дешевше латунних в експлуатації майже на 21–33%, без урахування прибутку від економії палива за рахунок більш високого ККД.

На морських транспортних судах закордонного будівництва встановлюються гребні гвинти, що виготовлені на спеціалізованих заводах. Наприклад, у Голландії – ЛППС, в Англії – «Стоун», в Італії – «Ансальдо», в Японії – «Міцубісі», «Амагасакі», «Покошіма» та ін.

Основні марки латуні і бронзи, що застосовують для виготовлення гребних гвинтів в різних країнах, наведено в таблиці 2 [13].

У процесі експлуатації стан поверхонь лопатей гребних гвинтів, виготовлених із будь-яких матеріалів, значно погіршується.

Причинами погіршення є:

- високі окружні швидкості, перепади тисків уздовж лопаті, абразивні частинки, що містяться у воді, електрохімічна корозія і кавітаційна ерозія;

- знецинкування, тобто видалення цинку зі сплаву, якщо відсутній протекторний захист латунних гребних гвинтів (особливо у тропічних водах). У цьому випадку метал лопатей у районі кромки набуває губкоподібного вигляду і стає менш міцним;

- випадання на поверхню гвинта катодного соляного осаду, що призводить до збільшення шорсткості лопатей гребних гвинтів в експлуатації;

- обростання гребного гвинта зоопланктоном та водоростями (призводить до різкого збільшення шорсткості лопатей). Як правило, для суден, що знаходяться у звичайній експлуатації, гребні гвинти обростають більш помірно в порівнянні з будь-якими частинами корпусу судна.

Збільшення шорсткості лопаті впливає на гідродинамічні характеристики, а саме, зменшують тангенс кута нахилу залежності коефіцієнта підйомної сили та значення нульового кута атаки та підвищує значення коефіцієнта профільного опору.

Таблиця 2. Марки латуні і бронзи, що застосовують для гребних гвинтів [13]

Країна, фірма	Манганова латунь	Нікель-алюмінієві бронзи NiAl	Манганові алюмінієві
Англія, «Стоун»	Стоун (НТВІ)	Нікаліум АВ-2	Новостон (СМ1) Суперстон 70 Соностон (50МД)
Голандія	Ліма бронза	Куніал бронза 66	Ліндрунель 66 Ліндрунель 905
Італія, «Ансальдо»	Бронза А1-М	Ніальма	—
Франція, «Сосьєте Нантіз»	—	Нантіал UAR19-QR60	Мангал 99
Німеччина, «Теодор Цайзе»	G-SM57F45 G-SMN15 G-SMN17	G-NiB F60 Алкунік NiAlBz(DMR)	G-MnAlBzFe45 Al-MnBzl3 Куманал Куманал OZE1
США, «Болдуін Ліма Гамільтон», «Інтернейшнл Нікель компані», «Бетліхем Стіл Корпорейшн», «Неві Ярд»	— — QQB-726C	Ніаліт Нібрал Куніал —	ASS Type 5 — — —
Японія, «Нікашіба Міцубісі», «Амагасаки»	ASB2 — ASB8 ASB3	ASB4 и ASB6 A1BC3 Міцубісі	ASB7 — —

Таблиця 3. Параметри шорсткості гребних гвинтів різних класів

Зона поверхні	Параметри шорсткості Ra (Rz) для гребних гвинтів класів, мкм			
	особового	вищого	середнього	звичайного
Поверхня входячої кромки лопати на 0,1 довжини перетину від радіуса маточини та поверхня від 0,9R до кінця лопати	0,63	1,25	5,0 (20)	20 (80)
Поверхня маточини та лопати поза району входячої кромки від радіуса маточини до 0,4R, включаючи галтель переходу лопати в маточину	20 (80)	20 (80)	20 (80)	80 (320)
Решта поверхонь	1,25	2,5	10 (40)	80 (320)

Примітка. Для гребних гвинтів особливого класу діаметром понад 2,5 м і сталевих гребних гвинтів шорсткість зовнішніх поверхонь лопатей та маточин може бути встановлена на клас нижче із зазначенням у конструкторській документації.

Шорсткість зовнішніх поверхонь лопатей та маточини не повинна перевищувати вказаних значень у таблиці 3.

На рис. 3 представлені залежності зниження швидкості судна від часу експлуатації, спричинені різними факторами, перш за все шорсткістю гребного гвинта. Залежно від зони експлуатації сумарні втрати швидкості можуть сягати 25%.

У вітчизняних стандартах з виробництва гребних гвинтів застосовуються два показники: інтегральна характеристика шорсткості Ra , яка являє собою середнє арифметичне абсолютних значень відхилень профілю від середньої лінії в межах базової довжини, і Rz – середня висота нерівностей профілю, що визначається за п'ятьма максимальними виступами п'яти найбільш глибоким западинам на вимірюваному відрізку.

Найбільш поширені два методи визначення шорсткості поверхні – порівняння зі спеціальним шаблоном (еталоном) (рис. 4) та аналіз профілограм.

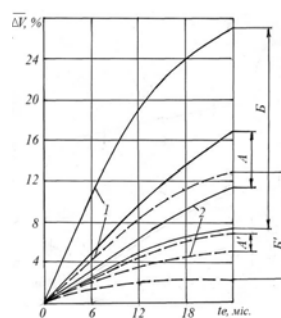


Рис. 3. Зниження швидкості теплоходу (гвинт бронзовий) від часу експлуатації:

1 – сумарна втрата швидкості;
2 – витрати внаслідок збільшення шорсткості гвинта;
А, А' – вплив на швидкість зміни ККД гвинта, викликаного шорсткістю корпусу;
Б, Б' – зворотній вплив попутного потоку;
— зона «Тропіки»;
- - - - - зона «Зима».



Рис. 4. Еталони шорсткості поверхні гребних гвинтів суден Elcometer 133

Вони були розроблені під певні профілі поверхонь, що відносяться до стану гребних гвинтів суден протягом усього терміну їх служби. Еталони також поставляються з Керівництвом по складанню звітів про стан гребних гвинтів. Існують дві версії еталонів, одна з яких призначена для контролю поверхні гребних гвинтів в сухому доці, а інша – для робіт, що проводяться під водою (табл. 4).

Таблиця 4. Значення параметрів Ra , Rz для контролю гребних гвинтів

Параметри	Поверхневий еталон	Підводний еталон
Ra	1, 2, 4, 8, 16, 30 мкм	1, 2, 4, 8, 16, 30 мкм
Rz	6, 12, 24, 48, 96, 180 мкм	6, 12, 24, 48, 96, 180 мкм

Ремонт гребних гвинтів є одним з важливих елементів їх експлуатації і проводиться під наглядом відповідних відділень Регістру [14], правила якого визначають вимоги до матеріалів, встановлюють норми міцності лопатей, мінімальні розміри шпильок, що кріплять зйомні лопаті.

Обсяг, технологія і методи проведення ремонту залежать від матеріалу, з якого виготовлений гребний гвинт, виду і розмірів дефектів.

Використовують наступні методи ремонту, шліфування і балансування гребного гвинта [15]:

- необезлічений (індивідуальний) метод;
- знеособлений метод;
- агрегатний метод;
- метод періодичної заміни ремонтних комплектів.

Після ремонту гвинти піддають балансуванню.

Визначення шорсткості поверхні лопатей гребних гвинтів до і після шліфування здійснюється шляхом зіставлення стану поверхні лопатей зі спеціальними шаблонами-еталонами (компараторами Руберто) або зразками шорсткості за ГОСТ 9378-75 і ГОСТ 8.300-78. Зіставлення проводиться візуально або навіпамачки. Величина шорсткості приймається рівною відповідному ідеалу (зразком) або проміжному значенню між двома найближчими шаблонами (зразками). Шорсткість поверхні після чистового шліфування й полірування поверхонь лопатей в районі ремонту повинна складати Ra 0,32 мкм.

Після шліфування шорсткість лопатей визначається як середня по зонам I і II. Результати оцінки шорсткості гвинта до і після шліфування повинні бути занесені в паспорт гребного гвинта за формою ГОСТ 5.4391-83 в розділ 9 «Відомості про оглядах і ремонтах гребного гвинта в період експлуатації» і зафіксовані в особливих відмітках машинного журналу.

За даними «Аустраліан Андерватер Інжиніринг» після 12–14 місяців експлуатації швидкість суден знижується до 10%, відновлення швидкості досягається додатковою витратою палива, що становить 8–12%.

ВИСНОВКИ

1. Вартість палива є найдорожчою складовою ЖЦ будь-якого судна.

2. Серед напрямів зі збереження палива чільне місце посідає раціональна експлуатація пропульсивного комплексу судна. Зокрема, це стосується гребного гвинта.

3. Проблема економії палива та енергоресурсів на морських судах може вирішуватися шляхом моделювання характеристик судна за допомогою, перш за все, вибраного матеріалу гребного гвинта, шорсткості поверхонь гвинта. Підвищення шорсткості поверхонь гвинта призводить до значних перевитрат палива і зниження швидкості судна за рахунок зростання моменту тертя і зниження коефіцієнта упору.

4. Сьогодні паливо для СЕУ розглядається не лише з позицій надійності роботи установок та економії, а й з урахуванням виконання вимог щодо екології. Це складне завдання значною мірою можна вирішити, використовуючи новітні матеріали гребного гвинта заданої шорсткості.

5. За результатами аналізу встановлено, що найбільш доцільним матеріалом для виготовлення гребних гвинтів з точки зору сукупності показників конструкційної міцності, зносостійкості та експлуатаційної надійності є алюмінієві бронзи.

Незважаючи на більш високу вартість виробництва (~ на 25–35%), гребні гвинти з алюмінієво-нікелевої бронзи, внаслідок більш високої стійкості і надійності, дешевше латунних в експлуатації майже на 21–33%, без урахування прибутку від економії палива за рахунок більш високого ККД.

REFERENCES

- [1] MARPOL 73/78. Prylozhennia VI (peresmotrennoe) k Konventsii «Pravila predotvrashcheniia zagriazneniia vozdukh s sudov» [MARPOL 73/78. Annex VI (revised) to the Convention «Rules for the Prevention of Air Pollution from Ships»]. URL: http://rise.odessa.ua/texts/MARPOL_VI_18.php3 (access date 07.01.2023). [In Ukrainian]
- [2] Zablotsky Yu.V. (2020) Pidvyshchennia ekonomichnosti roboty sudnovykh dyzeliv. U Sudnovi enerhetychni ustanovky: naukovo-tekhnichnyi zbirnyk [Increasing the efficiency of ship diesel engines / Ship power plants: scientific and technical collection.]. Vol. 40. Odesa: NU «OMA», pp. 12–16. [In Ukrainian]
- [3] Pizintsali L.V., Shumylo O.M., Rossomakha O.I., Aleksandrovska N.I., Rossomakha O.A., Rabocha T.V., Malyshekin O.V. (2023) Analiz vplyvu alternatyvnykh vidiv palyva na vartist zhyttievoho tsyklu sudna [Analysis of the influence of alternative types of fuel on the cost of the life cycle of the ship.] / Collection of scientific works of the National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov. Scientific publication No. 1(490). P. 19–29. [In Ukrainian]
- [4] Metody zakhystu obladnannia vid korozii ta zakhyst na stadii proektuvannia [Methods of protecting equipment from corrosion and protection at the design stage] [Electronic resource]: sub. for students specialty 161 «Chemical technologies», specialization «Electrochemical technologies of inorganic and organic materials» / M. V. Byk, O. I. Buket, G. S. Vasiliev - Electronic text data (1 file: 8.81 MB). – Kyiv: KPI named after Igor Sikorskyi, 2018. 318 p. [In Ukrainian]
- [5] Brukhanda V. S., Babichev D. M. (2018) Biokoroziiia korpusu sudna ta sposoby yii unykannia [Biocorrosion of the vessel hull and ways to avoid it] // Materials of the 8th All-Ukrainian Student Scientific Conference [Modern problems of maritime transport and maritime safety] in 2 vols., (Kherson, November 22, 2018). Kherson: KhDMA Publishing House, Vol. 1. 376 p. [In Ukrainian]
- [6] Bohdan Yu.O., Manzhelei V.S., Satulov A.I., Khudyakov I.V. (2018) Vyznachennia hvyntovykh kharakterystyk sudnovoho holovnoho malooborotovoho dyzelia na trenazheri mashynnoho viddilennia TRANSAS ERS 5000 TECHSIM [Determination of propeller characteristics of the ship's main low-speed diesel on the engine room simulator TRANSAS ERS 5000 TECHSIM] // Modern power plants on transport and technologies and equipment for their maintenance. / Kherson: KhDMA. (https://rep.ksma.ks.ua/bitstream/Bohdan_hel.). [In Ukrainian]
- [7] Aftanyuk V.V., Havrilkin O.E. (2019) Modeliuvannia hidrodynamiky korpusu sudna z urakhuvanniam biolohichnoho zabrudnennia [Modeling of ship hull hydrodynamics taking into account biological pollution. Ship power plants: scientific and technical collection.] Vol. 39. Odesa: NU «OMA», P. 14–21. [In Ukrainian]
- [8] Korol Y.M., Kornelyuk O.M. (2020) Optymizatsiia parametriv hrebnykh hvyntiv yak odyin iz shliakhiv pidvyshchennia enerhetychnoi efektyvnosti suden [Optimization of propeller parameters as one of the ways to increase the energy efficiency of ships] // Modern energy installations on transport and technologies and equipment for their maintenance. 11th International Scientific and Practical Conference, September 8–10, Kherson: Kherson State Maritime Academy. P. 180–183. [In Ukrainian]
- [9] Opryshko M.O. (2020) Zastosuvannia nanotekhnolohii v sudnobuduvanni [Application of nanotechnologies in shipbuilding // Ship power plants: scientific and technical collection.] Vol. 40. Odesa: NU «OMA», P. 134–138. [In Ukrainian]
- [10] Grigorieva O.S. (2020) Zastosuvannia nanomaterialiv u zakhysnykh pokryttiakh vid korozii i obrostannia konstruktsii [The use of nanomaterials in protective coatings against corrosion and fouling of structures] // Ship power plants: scientific and technical collection. Vol. 40. Odesa: NU «OMA», P. 139–143. [In Ukrainian]
- [11] Savas Sezen, Dogancan Uzun, Osman Turan, Mehmet Atlar (2021) Influence of roughness on propeller performance with a view to mitigating tip vortex cavitation, Ocean Engineering, Volume 239, 109703 ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109703>.
- [12] Pizintsali L.V. (2021) Metodolohichni osnovy orhanizatsiino-tekhnologichnykh protsesiv utylizatsii suden: monohrafiia [Methodological foundations of organizational and technological processes of ship disposal: monograph.] – Kherson: ALDI-PLUS, 2021. 308 p. ISBN 978-966-289-488-2. [In Ukrainian]
- [13] T.V. Kimstach, K.I. Uzlov, S.I. Repyakh, L.I. Solonenko. (2020) Analiz normatyvnykh vymoh do materialu dlia vyhotovlennia hrebnykh hvyntiv [Analysis of regulatory requirements for the material for the manufacture of propellers] // Metallurgical and mining industry. No. 3. P. 28–38. [In Ukrainian]
- [14] Rehistr sudnoplavstva Ukrainy. «Pravyla pobudovy ta klasyfikatsii morskyykh suden» [Shipping Register of Ukraine. «Rules for construction and classification of marine vessels»] Kyiv, 2015. 616 p. [In Ukrainian]
- [15] Lipenkov I.V. (2019) Analiz suchasnykh metodiv remontu, shlifuvannia i balansuvannia hrebnoho hvynta dlia velykotonnazhnykh suden [Analysis of modern methods of repair, grinding and balancing of the propeller for large-tonnage ships] / «Young scientist» No. 4 (68), Danube Institute of the National University «Odesa Maritime Academy» April, 2019, pp. 16–19. [In Ukrainian]

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] МАРПОЛ 73/78. Додаток VI (переглянутий) до Конвенції «Правила запобігання забрудненню повітряного середовища із суден». URL: http://rise.odessa.ua/texts/MARPOL_VI_18.php3 (дата звернення 07.01.2023).
- [2] Заблоцький Ю.В. (2020) Підвищення економічності роботи суднових дизелів / Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 40. – Одеса: НУ «ОМА», С. 12–16.
- [3] Пізінцалі Л.В., Шумило О.М., Россомеха О.І., Александровська Н.І., Россомеха О.А., Рабоча Т.В., Малишкін О.В. (2023) Аналіз впливу альтернативних видів палива на вартість життєвого циклу судна / Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова. Наукове видання №1(490). С. 19–29.

- [4] Методи захисту обладнання від корозії та захист на стадії проектування [Електронний ресурс]: підр. для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології», спеціалізації «Електрохімічні технології неорганічних та органічних матеріалів» / М. В. Бик, О. І. Букет, Г. С. Васильєв – Електронні текстові дані (1 файл: 8,81 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 318 с.
- [5] Бруханда В. С., Бабічев Д. М. (2018) Біокорозія корпусу судна та способи її уникнення // Матеріали VIII Всеукраїнської студентської наукової конференції [Сучасні проблеми морського транспорту та безпека мореплавства] в 2-х т., (м. Херсон, 22 листопада 2018 року). – Херсон : Видавництво ХДМА, – Том. 1. – 376 с.
- [6] Богдан Ю.О., Манжелей В.С., Сатулов А.І., Худяков І.В. (2018) Визначення гвинтових характеристик суднового головного малооборотного дизеля на тренажері машинного відділення TRANSAS ERS 5000 TECHSIM // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. / Херсон: ХДМА. (https://rep.ksma.ks.ua/bitstream/Bohdan_hel).
- [7] Афтаниук В.В., Гаврілкін О.Є. (2019) Моделювання гідродинаміки корпусу судна з урахуванням біологічного забруднення. Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 39. – Одеса: НУ «ОМА», С. 14–21.
- [8] Король Ю.М., Корнелюк О.М. (2020) Оптимізація параметрів гребних гвинтів як один із шляхів підвищення енергетичної ефективності суден // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. 11-а Міжнародна науково-практична конференція, 08 – 10 вересня – Херсон: Херсонська державна морська академія. С. 180–183.
- [9] Опришко М.О. (2020) Застосування нанотехнологій в суднобудуванні // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 40. – Одеса: НУ «ОМА», С. 134–138.
- [10] Григор'єва О.С. (2020) Застосування наноматеріалів у захисних покриттях від корозії і обростання конструкцій // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 40. – Одеса: НУ «ОМА», С. 139–143.
- [11] Savas Sezen, Dogancan Uzun, Osman Turan, Mehmet Atlar. (2021) Influence of roughness on propeller performance with a view to mitigating tip vortex cavitation, Ocean Engineering, Volume 239, 109703, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109703>.
- [12] Пізінцалі Л.В. (2021) Методологічні основи організаційно-технологічних процесів утилізації суден: монографія. – Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 308 с. ISBN 978-966-289-488-2.
- [13] Т.В. Кімстач, К.І. Узлов, С.І. Реп'ях, Л.І. Солоненко. (2020) Аналіз нормативних вимог до матеріалу для виготовлення гребних гвинтів // Металургійна та гірничорудна промисловість. № 3. С. 28–38.
- [14] Регістр судноплавства України. «Правила побудови та класифікації морських суден». Київ, 2015 р., 616 с.
- [15] Ліпенков І.В. (2019) Аналіз сучасних методів ремонту, шліфування і балансування гребного гвинта для великотоннажних суден / «Молодий вчений» № 4 (68), Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія» квітень, С. 16–19.

© Александровська Н. І., Пізінцалі Л. В., Россомаха О. І., Россомаха, О. А.
Дата надходження статті до редакції: 26.10.2023
Дата затвердження статті до друку: 16.11.2023