

ТРАНСПОРТ

УДК 531.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/36>

Биковець Н.П.

Дунайський інститут

Національного університету «Одеська морська академія»

АНАЛІЗ ВПЛИВУ БІОБРОСТАННЯ КОРПУСУ СУДНА НА ДИНАМІКУ РУХУ СУДНА

Підвищення експлуатаційних характеристик є одним із найважливіших питань технічних об'єктів. Для судна дана продуктивність головним чином залежить від ефективності його головної силової установки та опору, що створюється під час його руху. Через важливість енергетичної ефективності та скорочення викидів у судноплаванні було розроблено низку числових моделей для оцінки характеристик судна. Такі моделі включають різні компоненти, наприклад, опір спокійній воді. Загальний опір судна, у свою чергу, залежить від опору тертю корпусу через наявність різних типів шорсткості на поверхні корпусу, включаючи біобростання підводної частини. Біологічне обростання та забруднення моря створюють серйозні проблеми для морської галузі, що спонукає до великих дослідницьких зусиль для визначення ефективних рішень. У статті проаналізовано вплив біобростання корпусу судна на окремі параметри, що характеризують ефективність руху судна. Зокрема, розвиток шару біобростання, коли на поверхні судна накопичуються мікро- і макроорганізми, призводить до значного зниження швидкості судноплавства. Зниження швидкості впливає на збільшення часу плавання судна та витрати палива. Міжнародною морською організацією визнано, що неузгоджена політика запобігання біобростанню та підводного очищення створює серйозні проблеми для судноплавної галузі. Очищення корпусів суден від шару слизу різної завтовшки, що покриває до 50% поверхні корпусу, може знизити викиди парникових газів на судні від 20 до 55% залежно від характеристик судна, швидкості та інших переважаючих умов. Проведений аналіз залежності опору тертю від швидкості руху судна. Продемонстровано спосіб розв'язку задачі щодо динаміки прямолінійного руху судна. Наведені методики розрахунків можуть бути застосовані при виконанні порівняльного аналізу зміни швидкості та пройденого шляху судном в залежності від ступеню біобростання.

Ключові слова: біобростання, шорсткість корпусу судна, опір, швидкість, забруднення.

Постановка проблеми. У міжнародному судноплаванні глобальним та актуальним питанням з експлуатаційної та еколого-гігієнічної точок зору є проблема морського обростання підводної частини судна. Причиною є біологічні обростання на змочених поверхнях. Наростання на підводній частині борту у вигляді скупчення мікроорганізмів, водоростей, рослин чи тварин (особливо моллюски) призводять до зниження експлуатаційної здатності суден, до збільшення витрат палива та зменшення швидкості руху суден. На швидкість біобростання впливають наступні фактори, серед яких: період простою судна, тривалість рейсу, швидкість руху судна, місце розташування, фактори навколишнього природного середовища, зокрема річні та сезонні коливання температури. Через підвищення температури пришвидшуються процеси росту клітин, корозії зануреної частини корпусу судна [1]. Мор-

ське біобростання призводить до збільшення шорсткості корпусу, що є наслідком зростання супротиву судна, турбулентності та поверхневого тертя. У результаті збільшуються обсяги споживання палива, викидів парникових газів і поширення шкідливих видів.

Згідно з доповіддю, опублікованою Міжнародною морською організацією (International Maritime Organization (IMO) у січні 2022 року [2], неузгоджена політика запобігання біобростанню та підводного очищення створює серйозні проблеми для судноплавної галузі. Проте у звіті зазначені деякі країни, регіони та зони, де діє політика та практика запобігання біобростанню. У звіті сформульований висновок, що комплексна політика управління біобростанням не набула широкого поширення, а вимоги не узгоджені серед країн, що впроваджують ці заходи, включаючи Нову Зеландію та Каліфорнію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Біообростання корпусу судна та гребного гвинта призводить до збільшення шорсткості цих поверхонь, що відображується на підвищенні гідродинамічного опору корпусу та зниженні ефективності роботи гребного гвинта, зростає потреба у збільшенні потужності для руху судна із заданою швидкістю, що є наслідком значних витрат палива, викидів забруднюючих речовин у повітря та парникових газів (рис. 1).

Згідно з проведеними у [4] розрахунками для суден легкої водотоннажності легке шламове покриття, що вкриває усю поверхню корпусу, може збільшити загальний опір на 7–9%, а важке покриття – на 15–18%. Морські водорості та дрібні молюски підвищують опірність ще на 20–30% [4]. Існує пряма кореляція між шорсткістю корпусу судна та його забрудненням. Згідно з розрахунками, опір тертю у суден, що йдуть з високими швидкостями, зростає на 5% на кожні 10–20 мкм збільшення шорсткості корпусу (рис. 2).

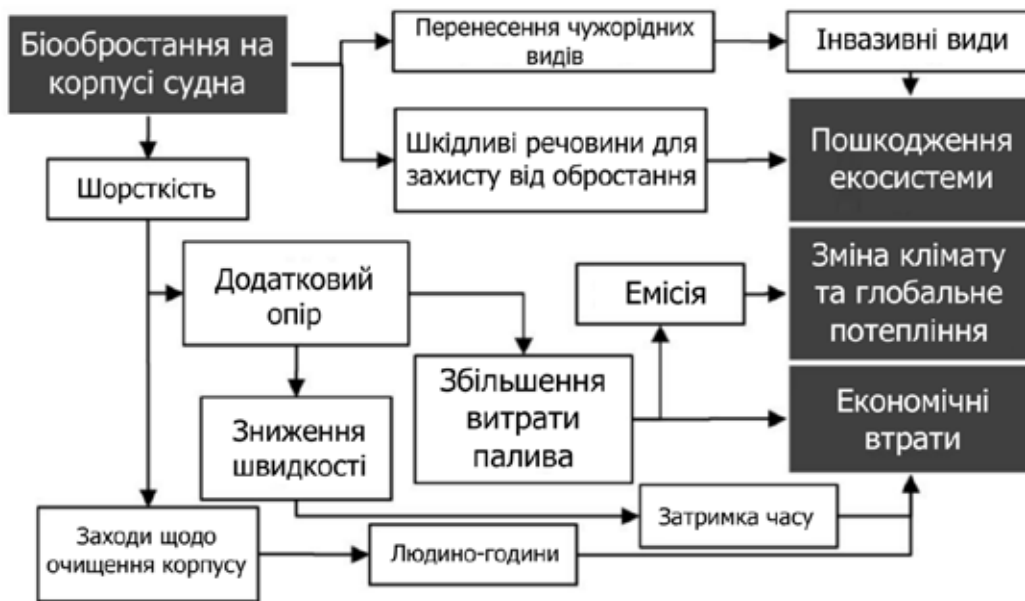


Рис. 1. Взаємозв'язок між проблемами, спричиненими біообростанням [3]

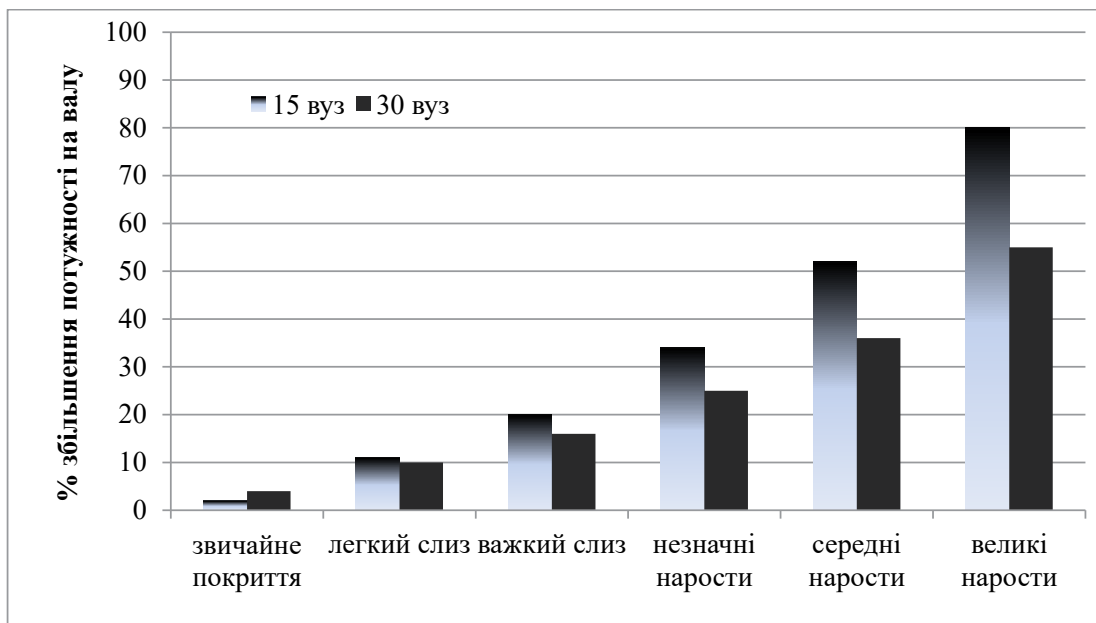


Рис. 2. Збільшення у відсотках необхідної потужності на валу під час руху судна на швидкості 15 та 30 вузлів за умов різного стану корпусу судна (на прикладі судна класу FFG-7) [5]

Біообростання корпусу судна негативно впливає на опір спокійній воді (рис. 3). Опір спокійній воді за умов середнього забруднення збільшується приблизно на 25% у порівнянні зі станом чистого корпусу, а при сильному забрудненні – більш як на 50% [6].

Відповідно до звіту Міжнародної морської організації «Про вплив біообростання суден на викиди парникових газів» опублікованому у лютому 2022 р., очищення корпусів суден від шару слизу завтовшки 0,5 мм, що покриває до 50% поверхні корпусу може знизити викиди парникових газів на судні від 20 до 25% залежно від характеристик судна, швидкості та інших переважуючих умов [7]. За умови очищення від середніх наростів – до 55% (на прикладі контейнеровозу середньої довжини). Загалом, звіт чітко показує, як сприятливий вплив біообростання недооцінювався судноплавною спільнотою.

Моніторингова компанія WE4SEA [8] продемонструвала приклад впливу очищення корпусу судна на щоденне споживання палива. Очищення корпусу судна знизило різницю між нормальним споживанням і фактичним з 10% до 0,2% (на прикладі моделі Digital Twin). Далі різниця збільшувалася приблизно на 1% кожного наступного місяця (рис. 4).

Отже, враховуючи безпосередній зв'язок між забрудненням корпусу та гвинта й споживанням мазуту, постало питання щодо проведення дослідження з планування маршруту руху судна, що підкреслює вплив забруднення та океанських течій на його оптимальний вибір. Оптимальне

планування маршруту в поєднанні зі станом забруднення корпусу та гвинта систематично перевірялося шляхом врахування спільного впливу забруднення корпусу та гвинта на морські течії [6]. Забруднення впливає на опір тертю, що є основним компонентом водонепроникності судна. Океанічні течії також позитивно чи негативно впливають на стійкість суден до спокійної води. Коли забруднення збільшується, процес планування маршруту надає перевагу маршрутам із позитивним впливом морських течій, особливо в більшій мірі, ніж коли рівень забруднення низький. Якщо в процесі планування маршруту знехтувати океанськими течіями, прогнозоване споживання мазуту буде відрізнятися від фактичного, і розрахункові оптимальні маршрути можуть бути неможливими в реальних морських умовах для необхідної швидкості. Це може призвести до набагато більшого споживання палива, ніж очікувалося, або до добровільної втрати швидкості [6].

Постановка завдання. Мета статті – провести аналіз впливу біообростання корпусу судна на динаміку руху судна.

Виклад основного матеріалу. Біологічне обростання є важливою проблемою в судноплавній промисловості, оскільки воно спричиняє збільшення шорсткості поверхні, що є причиною значного зниження швидкості судноплавства.

Питання припусків на шорсткість обговорювались на Міжнародній конференції буксирувальних танків (ITTC – the International Towing Tank Conference) ще у середині минулого століття [9].

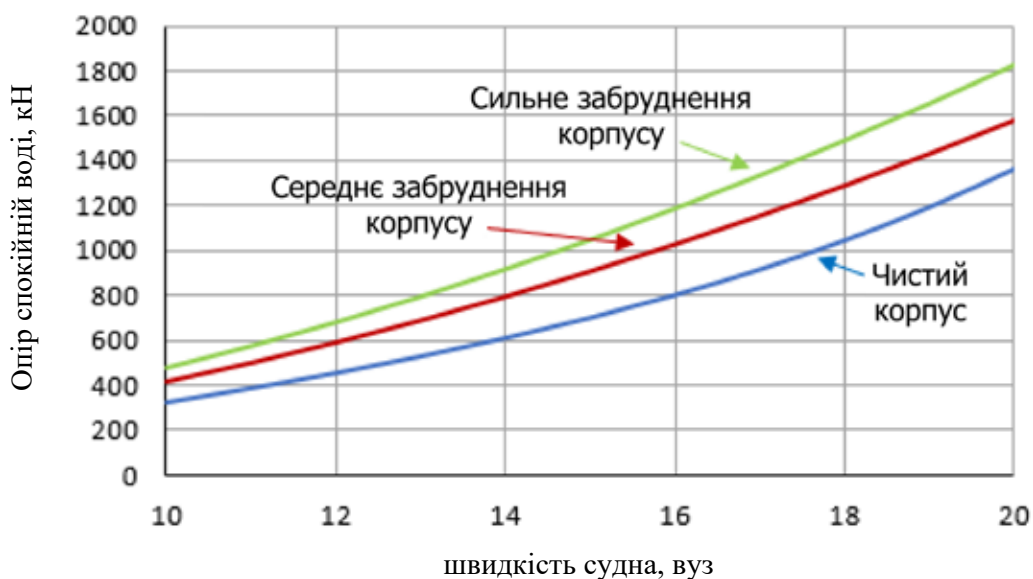


Рис. 3. Вплив забруднення на криві опору спокійній воді

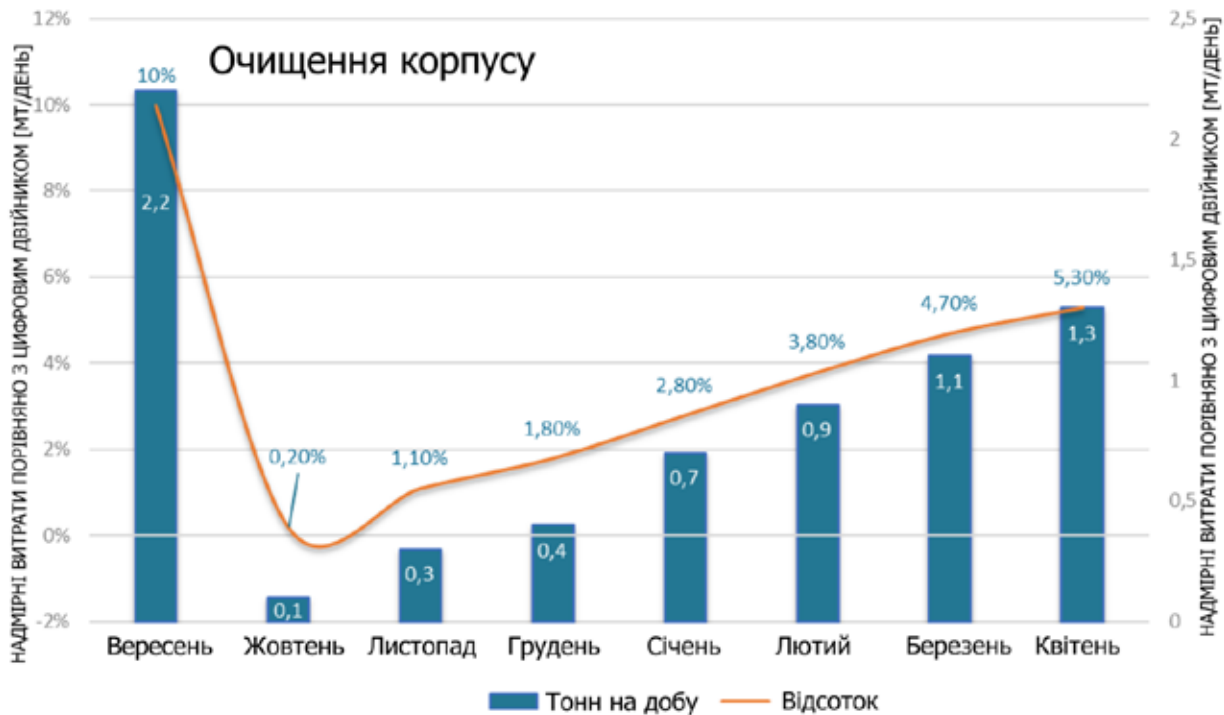


Рис. 4. Надмірні витрати порівняно з цифровим двійником

При цьому кореляційний допуск розраховувався за формулою:

$$\Delta C_F \times 10^3 = 105 \left(\frac{k_s}{L} \right)^3 - 0,64 \quad (1)$$

де k_s – середня шорсткість корпусу або середня видима амплітуда на межі 50 мм;

L – довжина судна, що не повинна перевищувати 400 м.

Оскільки на той час величину шорсткості корпусу для більшості суден було складно визначити, була прийнята величина стандартної амплітуди $k_s = 150 \cdot 10^{-6}$ м.

З часом вираз (1) набув змін. Формули, запропоновані Німено (2) й Townsin (3) були отримані з інтегральних методів 3-D граничного шару, включаючи залежність від числа Рейнольдса:

$$\Delta C_F = 0,0180 \times 10^{-3} \left(\frac{k_s}{L} \right) Re^{0,75} \quad (2)$$

$$\Delta C_F = 0,044 \left[\left(\frac{k_s}{L} \right)^3 - 10 Re^{-\frac{1}{3}} \right] + 0,000125 \quad (3)$$

де Re – число Рейнольдса.

М.Л. Хаким у своїй праці «Дослідження витрати палива на діючому судні через зростання біообростань та якості протиобростаючого покриття» наводить приклад залежності між кое-

фіцієнтом тертя та швидкістю судна [3]. Морські водорості та дрібні молюски можуть підвищувати опірність на 20–30%. Приймаємо максимальний коефіцієнт тертя $C_{F,max} = 30\%$. Підвищений опір через забруднення корпусу розраховується за формулою:

$$R_F(V) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot C_F(V) \quad (4)$$

де V – швидкість судна, м/с;

ρ – густина морської води, кг/м³;

S – площа змоченої поверхні корпусу судна, м².

Тут C_F розраховується на основі формули ІТТС, а потім множиться на 130%, де C_F є функцією числа Рейнольдса, поданого у виразі 6.

$$C_F(V) = \frac{0,075}{(\log_{10} Re(V) - 2)^2} \quad (5)$$

$$Re(V) = \frac{\rho \cdot L \cdot V}{\mu} \quad (6)$$

де μ – динамічна в'язкість морської води, Па·с.

Використовуючи (4), отримано графік залежності опору тертя від швидкості руху судна (рис. 5).

З аналізу випливає, що при тій же потужності нормального безперервного режиму (NCR – Normal Continuous Rating), швидкість спадає з 14 до 12 вузлів. Зниження швидкості впливає на збільшення часу плавання судна. У даному випадку

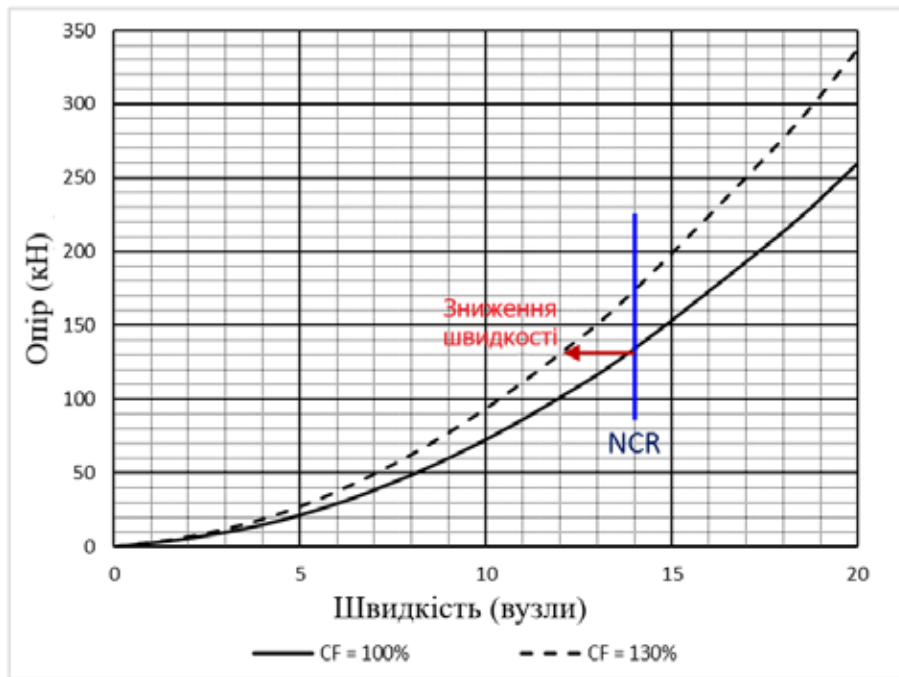


Рис. 5. Крива опору за рахунок збільшення C_F

час плавання збільшується на 16,7%, як і витрата палива.

У курсі дисципліни «Теоретична механіка» розглядається задача динаміки прямолінійного руху судна [10]. У задачі нехтують розмірами судна у порівнянні з відстанями, яке воно проходить, течією та вітром. За умови прямого положення руля судно здійснює горизонтальний прямолінійний рух, який описується диференціальним рівнянням:

$$(m + \lambda) \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} + \vec{R}, \quad (7)$$

де m – маса судна, кг;

λ – маса води, яка зумовлена дією в'язкості води на занурену частину корпусу, коли судно рухається (у модельних задачах $\lambda = 0,1m$), кг;

F – сила тяги двигуна, Н;

R – сила опору руху, $(\text{кг}\cdot\text{м})/\text{с}^2$.

Обтікання судна при характерних експлуатаційних значеннях швидкості супроводжується виникненням турбулентного потоку, то сила опору водного середовища пропорційна квадрату швидкості:

$$R = -\alpha v^2, \quad (8)$$

де α – коефіцієнт опору водного середовища, який залежить від завантаження судна, форми зануреної частини корпусу та його стану (тобто ступеню біобростання), а знак « \leftarrow » вказує, що ця сила спрямована завжди проти швидкості руху судна, $\text{кг}/\text{м}$.

Для спрощення формул, введемо $m_e = 1,1m$ – ефективну масу судна, тоді рівняння (7) з врахуванням (8) в проекції на вісь x , що спрямовують за напрямом руху судна, приймає вигляд:

$$m_e \frac{dv}{dt} = \pm |F| - \alpha v^2. \quad (9)$$

Рівняння (9) доповнюють початковими умовами (для зручності враховується, що відлік координати співпадає з початковим положенням судна): при $t = 0$, $x_0 = 0$, $v = v_0$. Кожному значенню сили тяги $F > 0$ відповідає перехідний процес зміни швидкості ($dv/dt \neq 0$), що закінчується досягненням усталеного значення швидкості v_y :

$$v_y = \sqrt{F / \alpha}. \quad (10)$$

Після виконання ряду перетворень отримано рівняння

$$t = m_e \int_{v_0}^v \frac{dv'}{\pm |F| - \alpha (v')^2}, \quad (11)$$

що дозволяє знаходити час як функцію швидкості $t(v)$, або (після відповідних алгебраїчних перетворень) визначати швидкість судна як функцію часу $v(t)$.

Для визначення шляху, який проходить судно, можна скористатися інтегруванням $v(t)$, але простіше застосувати перетворення

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = v \cdot \frac{dv}{dx}.$$

Тоді зрівняння (9) отримуємо $dx = m_e \frac{v dv}{\pm |F| - \alpha v^2}$,

що за початковими умовами ($t = 0$, $x_0 = 0$, $v = v_0$), дозволяє визначити шлях S , який проходить судно в процесі зміни швидкості від початкової v_0 до поточного значення v

$$\int_0^S dx = S = m_e \int_{v_0}^v \frac{v' dv'}{\pm |F| - \alpha (v')^2}, \quad (12)$$

і таким чином визначити шлях як складну функцію часу $S(v(t))$.

Наведені методики розрахунків можна використовувати для порівняльного аналізу зміни швидкості та пройденого шляху судном в залежності від ступеню біообростання.

Висновки. Біообростання підводної частини корпусу судна відноситься до найбільш складних та важких явищ. Воно призводить до зниження швидкості руху судна. Шорсткість, спричинена біообростанням, підвищує опір судна, що призводить до збільшення потреб у потуж-

ності та пальному. Дані компанії WE4SEA [8] підтверджують позитивний вплив очищення корпусу судна на ефективність руху. Додатково, висвітлено зростання вихідної потужності, яка перевищує приріст дієвої потужності через наявність твердих обростань. Форма підводної частини корпусу судна суттєво впливає на параметри, що характеризують ефективність його рушійної системи, зокрема, накопичення шару біоплівки може призвести до значного зниження швидкості плавання (приблизно на 25%). Рекомендовано регулярно проводити очищення корпусу судна та гребного гвинта для зменшення біообростання, підтримання оптимальної ефективності руху та зменшення викидів забруднюючих речовин. Також рекомендується враховувати вплив біообростання на ходові якості судна при проведенні діагностики судна, що може стати основою для судовласника при прийнятті рішення про економічну доцільність експлуатації судна з великими інтервалами часу між послідовними доками.

Список літератури:

1. Haoyi Qiu, Kang Feng, Anna Gapeeva, Kerstin Meurisch, Sören Kaps, Xia Li, Liangmin Yu, Yogendra Kumar Mishra, Rainer Adelung, Martina Baum. Functional polymer materials for modern marine biofouling control. *Progress in Polymer Science*. Volume 127, April 2022, 101516. URL: <https://doi.org/10.1016/j.propolymsci.2022.101516>
2. Report to the marine environment protection committee : sub-committee on pollution of 26.04.2022. <https://iadc.org/wp-content/uploads/2022/05/PPR-9-21-Report-To-The-Marine-Environment-Protection-Committee-Secretariat.pdf> (дата звернення: 19.03.2024).
3. Hakim M. L. Investigation of fuel consumption on an operating ship due to biofouling growth and quality of antifouling coating. MARINE SCIENCE AND TECHNOLOGY. MALUKU INTERNATIONAL CONFERENCE., Maluku, 24–26 October 2018. P. 458. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/339/1/012037/pdf> (дата звернення: 21.03.2024).
4. Roberts D, Rittschof D, Holm E, Schmidt A.R. Factors influencing initial larval settlement: temporal, spatial and surface molecular components. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. Volume 150, Issue 2, 9 August 1991, Pages 203–221. URL: [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(91\)90068-8](https://doi.org/10.1016/0022-0981(91)90068-8)
5. Schultz, Michael P. Assessing the Hydrodynamic Performance of Fouling-Release Surfaces. 2007. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA520374.pdf> (дата звернення: 09.03.2024).
6. Kytariolou A, Themelis N. Optimized Route Planning under the Effect of Hull and Propeller Fouling and Considering Ocean Currents. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023; 11(4):828. <https://doi.org/10.3390/jmse11040828>
7. International Maritime Organization, GloFouling Partnerships. Preliminary results Impact of Ships' Biofouling on Greenhouse Gas Emissions. 2022. 5 p. URL: <https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/Documents/Biofouling%20report.pdf> (дата звернення: 14.03.2024).
8. The effect of a hull cleaning – and how to measure it. We4Sea. URL: <https://www.we4sea.com/blog/the-effect-of-a-hull-cleaning-and-how-to-measure-it> (дата звернення: 12.03.2024).
9. The Specialist Committee on Powering Performance Prediction. Final Report and Recommendations to the 25th ITTC. Fukuoka, 2008. P. 417–420. URL: https://ittc.info/media/3485/volume2_1powering_perf_pred.pdf (дата звернення: 19.03.2024).
10. Козицький С.В. Теоретична механіка у задачах та прикладах: навчальний посібник / С. В. Козицький, О. С. Григор'єва – Одеса: НУ «ОМА», 2020. – 189 с.

Bykovets N.P. ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SHIP HULL BIOFOULING ON SHIP'S DYNAMIC MOTION

One of the most important issues concerning technical objects is the increase in their operating performance. For a ship, this performance mainly depends on the efficiency of its main propulsion system and the resistance generated during its motion. Due to the importance of energy efficiency and emission reduction in shipping, a number of numerical models have been developed to assess ship performance. Such models include various components, e.g. calm water resistance. The overall ship resistance, in turn, mainly depends on the hull friction resistance because of the presence of various types of roughness on the hull surface, including biofouling of its underwater part. Biofouling and marine pollution pose substantial challenges to the maritime industry, prompting extensive research efforts to identify effective solutions. The article analyzes the influence of ship hull biofouling on certain parameters characterizing the efficiency of a ship's motion. In particular, the extension of a biofouling layer, when micro- and macro-organisms accumulate on the ship's surface, leads to a significant reduction in shipping speed. The speed reduction increases the vessel's sailing time and fuel consumption. The International Maritime Organization recognizes that uncoordinated biofouling prevention and underwater cleaning policies pose serious challenges to the shipping industry. Cleaning ship hulls from a layer of slime of varying thickness, covering up to 50% of the hull surface, can reduce greenhouse gas emissions on board a ship by 20 to 55%, depending on the ship's characteristics, speed, and other prevailing conditions. The analysis of the dependence of friction resistance on the ship's speed is carried out. A method for solving the problem of a ship's dynamic route is demonstrated. The above-stated calculation methods can be used to perform a comparative analysis of changes in speed and distance sailed by a ship depending on the degree of biofouling.

Key words: biofouling, roughness of the hull surface, resistance, speed, pollution.