

КОМПЛЕКСНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ «ЗЕЛЕНОГО» СУДНОПЛАВСТВА

Ю.К. Яглицький

к. т. н., доцент кафедри суднобудування та ремонту суден,
Херсонський навчально-науковий інститут
Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова, Херсон, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-4865-0411

Анотація

Вступ. У наш час екологічні стандарти для суден стають дедалі жорсткішими, тому судноплавна галузь, яка є одним із перспективних засобів транспортування, що забезпечує більшу частину світової торгівлі, також відчуває суспільний тиск через необхідність удосконалення своєї роботи та вжиття заходів для зниження забруднень. Новітньою тенденцією в судноплаванні є так зване «зелене судноплавання» – комплекс технологічних інновацій, який привів до розроблення суден, обладнання та пального, які більш безпечні екологічно. **Метою** дослідження є аналіз можливостей застосування нових матеріалів, підвищення рівня енергоефективності судна, використання сучасних ефективних енергозберігаючих технологій у процесі створення суден, удосконалення енергоустановок судна, які відповідають новим вимогам екологічних стандартів і зменшують обсяг шкідливих викидів, розроблення екологічного та альтернативних видів палива, створення «екосуден». **Результати.** Розглянуті й досліджені основні напрями вирішення екологічних проблем у судноплаванні, які спрямовані на зменшення небажаних антропогенних змін навколишнього середовища. **Висновки.** У результаті проведеного дослідження обґрунтовано раціональність проведення розробок із таких питань: створення та класифікації нових матеріалів і технологій із використання композитів для корпусів суден, а також як багатофункціональних теплозвукоізоляційних матеріалів і покриттів; оптимізації обводів корпусів зі зміною дизайну та конструктивних особливостей судна; використання енергії вітру для підвищення рівня енергоефективності судна; удосконалення наявного досвіду у сфері розроблення й використання екологічного та альтернативних видів палива, зменшення негативного впливу на навколишнє середовище викидів із суден, а також побудови «екосуден» за принципами «зеленої логістики», яка дає можливість скоротити відходи й забруднення на всьому ланцюжку виробництва та поставок.

Ключові слова: «зелене судноплавання», композитні матеріали, оптимізація обводів суден, енергія вітру, альтернативні види палива, шкідливі викиди, екологічні стандарти, проекти «екосуден».

COMPREHENSIVE STUDY OF CURRENT TRENDS IN “GREEN” SHIPPING

Yu.K. Yahlytskyi

PhD in Engineering,

Associate Professor at the Department of Shipbuilding and Ship's Repair,
Kherson Educational-Scientific Institute
of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-4865-0411

Summary

Introduction. In our time, environmental standards for ships are becoming more stringent, so the shipping industry, which is one of the promising means of transportation that provides most of the World Trade, is also experiencing public pressure from the need to improve its work and take measures to reduce pollution. The latest trend in shipping is the so – called “Green navigation” – a complex of technological innovations that has led to the development of vessels, equipment and fuel that are more environmentally friendly. **Purpose.** Research and analysis of the possibilities of using new materials, improving the level of energy efficiency of the vessel, using modern efficient energy-saving technologies in the creation of vessels, improving the ship's power plants that meet the new requirements of environmental standards, reduce the amount of harmful emissions, environmental and alternative fuels, creating “eco-vessels”. **Results.** The main directions of solving environmental problems in navigation, which are aimed at reducing undesirable anthropogenic changes in the environment, are considered and studied. **Conclusions.** As a result of the research, the rationality of development in the field of creation and classification of new materials and technologies with the use of composites for both ship hulls and as multifunctional heat and sound insulation materials and coatings is justified; optimization of Hull contours with changes in the design and structural features of the vessel; the use of wind energy to increase the level of energy efficiency of the vessel; improvement of existing experience in the development and use of environmental and alternative fuels and reduce the negative impact of emissions from ships on the environment, as well as the construction of “eco-vessels” according to the principles of “green logistics”, which reduces waste and pollution throughout the production and supply chain.

Key words: “green navigation”, composite materials, optimization of ship contours, wind energy, alternative fuels, harmful emissions, environmental standards, “eco-vessels” projects.

Вступ і постановка проблеми. У наш час екологічні стандарти для суден стають дедалі жорсткішими, тому судноплавна галузь, яка є одним із перспективних засобів транспортування, що забезпечує більшу частину світової торгівлі, також відчуває суспільний тиск через необхідність удосконалення своєї роботи та життя заходів для зниження забруднень. Новітньою тенденцією в судноплавстві є так зване «зелене судноплавство» – комплекс технологічних інновацій, який привів до розроблення суден, обладнання та пального, які більш безпечні екологічно [1; 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що рух навіть одного судна може істотно впливати на навколишнє середовище. Це пов'язано з наявністю

викидів в атмосферу вихлопних газів від роботи головних двигунів, дизель-генераторів, котельних установок, а також зі зміною енергетики акваторії під час руху великогабаритного тіла. Істотним є також вплив теплових скидів і гідрозумів від роботи рушійно-рульового комплексу тощо. Природно, що за збільшення кількості й тоннажності суден такі дії не можуть не викликати небажані антропогенні зміни навколишнього середовища [3].

З огляду на збільшення гідрологічного забруднення морських і річкових акваторій та водоохоронних зон істотно зросли вимоги до екологічної безпеки судноплавства. Міжнародною конвенцією щодо запобігання забрудненню із суден (далі – Конвенція МАРПОЛ) передбачено істотне зменшення норм викидів відпрацьованих газів судових енергоустановок. Набула чинності Міжнародна конвенція про контроль судових баластних вод та опадів та управління ними (Ballast Water Management Convention – BWMC) 2004 р., яка спрямована на запобігання переносу морських організмів у нові для них природні екосистеми разом із баластними водами суден. Міжнародною морською організацією введено заборону на використання такого, що не відповідає новим нормам, морського палива на борту суден.

Щоб у майбутньому дотримуватися встановлених екологічних стандартів для судноплавної галузі щодо захисту навколишнього середовища, необхідно прикласти багато зусиль і здійснити капіталовкладення в економіку судноплавства. Однак, незважаючи на те, що обговорення концепції «зеленого» судноплавства концентрується здебільшого на якості функціональної роботи суден, суднобудівний сектор також сприяє очищенню навколишнього середовища. Інвестиції та поліпшення технологій, а також регуляторний тиск і вимоги клієнтів сприяють побудові «зелених суден», які скорочують викиди вуглекислого газу та використовують енергію судових двигунів оптимально.

Формулювання цілей статті. Метою дослідження було здійснення аналізу можливостей застосування нових матеріалів, підвищення рівня енергоефективності судна, використання сучасних ефективних енергозберігаючих технологій у процесі створення суден, удосконалення енергоустановок судна, які відповідають новим вимогам екологічних стандартів і зменшують обсяг шкідливих викидів, розроблення екологічного та альтернативних видів палива, створення «екосуден».

Виклад основного матеріалу.

Застосування композитних матеріалів. Сучасний етап розвитку суднобудування характеризується дедалі ширшим застосуванням композитів для корпусів суден різного призначення. Відомо, що застосування в конструкції корпусу судна композитів дає можливість значно скоротити терміни будівництва порівняно з традиційними матеріалами. Крім того, воно допускає використання істотно менш кваліфікованої та дешевшої робочої сили, ніж та, яка потрібна для побудови суден із традиційних матеріалів. Усе це зумовлює серйозну економічну мотивацію масової побудови суден із композитів [4]. Тому сьогодні більшу частину світового малотоннажного флоту становлять судна, що мають корпуси з неметалевих композитів. Наприклад, тільки в Японії в експлуатації перебуває більше трьохсот тисяч промислових суден із полімерних композитів різних типів.

Застосування композитів дає змогу створювати судна з високими аеро- й гідродинамічними характеристиками, з легкими надбудовами, ефектним дизайном

зовнішнього вигляду та низкою інших переваг. Завдяки композитам знижується загальна вага порівняно з металевими (сталевими) суднами (на 25–30 %), при цьому зменшується вартість елементів конструкцій (на 30–40 %) [5]. Із цього постає низка додаткових переваг: знижені експлуатаційні витрати, мала емісія газів, що викликають парниковий ефект, і значна економія палива. З'являється можливість за допомогою композитів усунути необхідність застосування скріплюючих елементів під час з'єднання деталей, що також сприяє зниженню ваги. Композити надають архітекторам неймовірну свободу дизайну, дають можливість виготовляти деталі складної форми. Крім того, якщо ми порівняємо композити з конкуруючими матеріалами, то побачимо, що ціна терміну служби в композитного виробу значно нижча, ніж у металевому, завдяки малим витратам на технічне обслуговування, установку та складання, які зумовлені корозійною стійкістю і міцністю.

Конструкція суднових корпусів із композитів у міру накопичення досвіду проектування, будівництва та експлуатації суден із цих матеріалів стала істотно відрізнятися від конструкції корпусів суден, які виготовлені з традиційних матеріалів, особливо у швидкісному малотоннажному суднобудуванні. Основні питання, що виникають під час проектування суден такого типу, за кордоном мають нормативне обґрунтування.

На зростаючому ринку суднобудівних композитів спостерігаються тенденції використання нових матеріалів і технологій. Постачальники сировини знову почали активно розвивати біосмоли, натуральні волокна, поліефіри з малою емісією шкідливих речовин, позаавтоклавні препреги, сендвіч-композити, а також склорогожі та скломати. Усе це зумовлене необхідністю підвищити перероблюваність і відновлюваність матеріалів, знизити вміст стиролу, поліпшити якість поверхні готових виробів.

Виготовлення більших, ніж судна промислового призначення, суден також вимагатиме використання значної кількості передових матеріалів, таких як вуглепластик та органопластик, нейлон, армований скловолокном, надміцний поліетилен HDPE (поліетилен високої щільності й низького тиску), композиції ламінату з кевлара та скломатеріалів, які нині зазнають поширення у світовій суднобудівній практиці [5; 6].

В умовах посилення вимог щодо екологічності суден нових поколінь зростає значення композитів як багатофункціональних теплозвукоізоляційних матеріалів і покриттів для облаштування суднових приміщень. Мала щільність матеріалів дає змогу застосовувати їх в архітектурі надводної частини суден усіх типів, що сприяє поліпшенню стійкості, зменшенню радіолокаційної помітності суден, полегшенню експлуатації корпусу.

Вітчизняний досвід проектування суден із композитів обмежується кількома десятками проектів суден, а також невеликих катерів і мотолодок. Водночас у світі щорічно створюється безліч проектів суден із композитів переважно цивільного призначення, що свідчить про те, що суднобудування є сферою, у якій композити застосовуються давно з високою економічною ефективністю виробництв таких суден, потреба в яких є і в Україні.

У процесі проектування сучасних суден із композитів у нашій країні важливо якомога ширше використовувати досвід зарубіжних країн, де ця галузь традиційно добре розвинена.

Оптимізація обводів корпусів суден. У світовій практиці проектування суден використовуються нормативні документи та рекомендації, що враховують багаторічний досвід експлуатації суден різних типів у різних умовах, експериментальні дані, а також теоретичні дослідження для вирішення складного завдання з вибору таких характеристик корпусу, які задовольняли би численні й часом суперечливі вимоги стосовно ходовості, міцності, мореплавства тощо [7]. Похибки в оцінці тих чи інших якостей судна призводять до проектних помилок, зниження безпеки плавання, погіршення економічності та екологічних стандартів.

З позиції процесів системної інтеграції можна розглядати підхід до проектування як до замкнутої системи інженерно-технічних рішень, яка включає такі блоки досліджень під час проектування судна:

- оптимізацію приватних технічних рішень, що допускають їх математичну формалізацію або експериментальну перевірку;
- евристичні методи пошуку технічних рішень, що спираються на досвід експлуатації морських суден у складних умовах плавання;
- розроблення правил судноводіння та експлуатації судових пристроїв, особливо в тих випадках, коли у проекті допускаються обмеження в особливих умовах плавання.

Нині необхідно вирішити низку проблем як щодо визначення структури всього процесу проектування, так і стосовно вдосконалення проектних характеристик суден та їх оптимізації. Необхідне розроблення способів проектного обґрунтування таких суден, що враховують різні аспекти їх подальшої експлуатації (як економічні, так і екологічні) та забезпечують їх конкурентоспроможність.

Як приклад можна розглядати конструкцію судових корпусів із композитів – вона стала істотно відрізнятися від конструкції корпусів суден, які виготовлені з традиційних матеріалів, особливо у швидкісному малотоннажному суднобудуванні. Складність обводів підводної частини корпусу судна значною мірою визначається технологічними можливостями обробки матеріалів, які застосовуються для виготовлення корпусу [8]. Композити мають безумовну перевагу над усіма традиційними суднобудівними матеріалами, тому судна з композитів характеризуються більш досконалими формами обтічної частини корпусу та зниженою шорсткістю її поверхні (див. рис. 1). Це дає змогу істотно знижувати небажані антропогенні зміни навколишнього середовища.

Використання енергії вітру. Вітрила використовуються людством для управління рухом морських суден із давніх часів, проте з розвитком інших технологій вони відійшли на другий план – транспортні та пасажирські великі судна для морських перевезень уже давно використовують двигуни, які працюють на паливі. Натомість через дедалі більш очевидне забруднення навколишнього середовища та пов'язані із цим зміни клімату низка компаній знову працює над тим, щоб повернути вітрила в комерційне суднобудування.

Класифікаційне товариство DNV GL (Det Norske Veritas & Germanischer Lloyd) оцінило можливості використання в комерційному судноплаванні як допоміжного рушія шести типів вітрил, що розроблені різними міжнародними компаніями для досягнення цілей, які поставлені Міжнародною морською організацією з досягнення в майбутньому нульових рівнів викидів вуглецю від судноплавання.



Рис. 1. Експериментальне судно Sea Jet із композитних матеріалів

Майже в усіх типах вітрил діє один фізичний принцип: вітер тисне на передню кромку вітрила, розділяючись на два окремі потоки, які перенаправляються та рухаються з різними швидкостями до задньої кромки. У результаті перепад тиску одночасно тягне та штовхає вітрило й судно вперед. Єдине, що змінилося, – це ефективність вітрил, матеріали, з яких вони зроблені, а також їх обробка та управління ними.

У дослідженні розглянуто декілька наявних технологій: роторний парус (MariGreen, NorsePower – використовуються на 5 суднах), вітрила з трьох жорстких лопатей (консорціум Windship), крилові вітрила DynaRig (Dykstra Naval Architects), звичайні м'які вітрила (NEOLINE), лопатеві м'які вітрила OceanWings, які випробувані на яхті Energy Observer (французькі компанії CNIM та VPLP пропонують їх для використання на вантажних суднах), аеродинамічні вітрила Ventifoil (eConowind).

На цей час найбільш поширена технологія роторного вітрила (Rotor Sails). Роторні вітрила – це модернізована версія ротора Флетнера для забезпечення допоміжної вітрової тяги до потужності двигуна.

У 2021 р. фінська інжинірингова компанія Norsepower встановила систему роторних вітрил на рудовоз «Sea Zhoushan». Можна зазначити, що «Sea Zhoushan» – це перший балкер дедвейтом 325000 тонн, який буде оснащений роторними вітрилами (див. рис. 2). Встановлення роторних вітрил на перший рудовоз типорозміру VLOC (Very Large Ore Carrier) демонструє, що технологія Rotor Sails адаптується до різних робочих профілів і типів суден.

Установка включає п'ять роторних вітрил висотою 24 метри та діаметром 4 метри, які можна нахилити за допомогою гідроциліндрів. Ротори складаються, що не створює перешкод під час вантажно-розвантажувальних робіт. Сьогодні Rotor Sails використовуються для оптимізації паливної економічності та скорочення викидів вуглецю.

Дослідження Ю. С. Крючкова показали, що судно з вітрилом можна представити у вигляді крильчатого або карусельного вітроводуна з нескінченним

діаметром колеса [9; 10]. У цьому випадку вітрило є найбільш досконалою лопатевою машиною з найвищим коефіцієнтом корисної дії, яка безпосередньо використовує енергію для руху. Водночас на судні з вітродвигуном енергія додатково втрачається у трансмісії та гребному гвинті, унаслідок чого для руху використовується значно менша частка енергії вітру.



Рис. 2. Балкер *Sea Zhoushan* дедвейтом 325000 тонн з 5 похилими роторними вітрилами

Тому на суднах, що приводяться в рух вітром, найбільш доцільно використовувати звичайні м'які, напівжорсткі та жорсткі вітрила (крила).

Варто зазначити, що за рахунок використання енергії вітру значно скорочується кількість шкідливих викидів щодо показників, звичайних для океанських вантажних суден із традиційними двигунами внутрішнього згоряння. Основний недолік вітрильників – порівняно мала швидкість пересування. Однак ця проблема зараз активно вирішується: для прискорення ходу, а також для підвищення рівня маневрування біля берега планується додатково оснащувати судна електричними моторами та сонячними батареями.

Використання екологічного та альтернативних видів палива. Проєкти екосуден. Морський транспорт вважається найбільш «брудним» за рівнем викидів токсичних речовин порівняно з іншими видами транспортних засобів. Основними токсичними речовинами, що визначають забруднення атмосфери відпрацьованими газами дизельних двигунів, є окис вуглецю CO, оксиди азоту NO_x та незгорілі вуглеводні C_nH_m, канцерогенні поліциклічні вуглеводні, сажа. За даними незалежних експертів, на частку комерційного судноплавства зараз припадає приблизно 2,5 % від світових викидів вуглекислого газу в атмосферу, 18–30 % від викидів оксидів азоту та 9 % – від оксидів сірки. Відповідність судового палива вимогам світових стандартів важлива як для безпечної експлуатації суден, здоров'я персоналу, так і для захисту навколишнього середовища [11].

Суднове паливо, яке використовується нині на судових енергетичних установках (високооберткових, середньооберткових і низькооберткових двигунах

внутрішнього згоряння), за своїми характеристиками поділяється на два види: легке та важке. До важкого палива належить флотський мазут (його ще називають залишковим важким паливом), а до легкого палива – суднове малов'язке паливо (СМТ, ТСМ) або солярку флотську, які застосовуються на судах, що обладнані високообертovими й середньообертovими двигунами [12].

Суднове малов'язке паливо порівняно з мазутом є більш екологічним паливом. Його обов'язково використовують у зонах контролю викидів ЕСА (Emission Control Areas), проте за умови виходу у відкритий океан судна переходять на мазут як на більш дешеве паливо. За вимогами Конвенції МАРПОЛ морське судноплавство має в найближчому майбутньому відмовитися від використання важкого мазуту, хоча в цій сфері зміни відбуваються повільно.

Як відомо, однією з основних проблем забруднення від судноплавства є високий вміст сірки в судовому паливі. Міжнародна морська організація запропонувала суворе регулювання рівнів сірки в паливі шляхом створення спеціальних зон контролю викидів SECA (Sulfur Emission Control Areas), де суднам дозволено використовувати тільки паливо з низьким вмістом сірки (0,1 %), а з 2020 р. суднам, які плавають в інших районах, необхідно буде використовувати паливо з вмістом сірки менше 0,5 %. Якщо паливо з низьким вмістом сірки не використовується, необхідно встановити системи фільтрації сірчистих сполук у вихлопному газі (скрубери) для видалення викидів SO_x .

На думку незалежних експертів, ці правила означають, що 70 % палива, яке нині використовується в морському секторі, необхідно модифікувати або змінити. Також треба враховувати, що в короткостроковій перспективі здійснюватиметься регулювання викидів парникових газів (CO_2).

На сьогодні паливо з низьким вмістом сірки, яке впроваджується в морському секторі, має маркування «VLSFO» (Very-Low Sulphur Fuel Oil) – мазут із дуже низьким вмістом сірки, який має від 0,1 % до 0,5 % сірки, і «ULSFO» (Ultra Low Sulfur Fuel Oil) – мазут із наднизьким вмістом сірки, що містить менше 0,1 % сірки. Воно відповідає обмеженням зон SECA [13].

Міжнародні ініціативи зі зниження шкідливих викидів із суден є драйверами пошуку альтернативних видів палива, серед яких зараз найбільш поширеними є зріджений природний газ (далі – ЗПГ), зріджений вуглеводневий газ, метанол, біопаливо та водень. Інші види палива, які можуть відігравати певну роль у майбутньому, – це зріджений нафтовий газ (LPG), етанол, диметиловий ефір (DME), біогаз, синтетичне паливо, водень (особливо для використання в паливних елементах) та ядерне паливо [13].

ЗПГ – найбільш вигідний з економічної та екологічної позицій аналог флотського мазуту. Спалювання газу виробляє до 90 % менше шкідливих викидів, він відповідає вимогам Конвенції МАРПОЛ за вмістом сірки та за концентрацією сполучень азоту. Однак незгорілий метан, що є основним складником ЗПГ, створює викиди з більш потужним парниковим ефектом, ніж двоокис вуглецю (CO_2). Проте, за запевненнями виробників двопаливних двигунів, обсяг незгорілого метану в сучасному обладнанні не настільки великий, тому використання таких двигунів дає зниження парникових газів у судноплавстві на 10–20 %. Однак не весь морський і річковий транспорт можна переобладнати для експлуатації на зрідженому газі як основному паливі. Традиційно його використовують танкери для

перевезення ЗПГ, де більшість перевізників користується двопаливними дизельними двигунами, які здатні споживати будь-яку комбінацію ЗПГ та бункерного палива. Застосування ЗПГ для внутрішнього судноплавства обмежене та здебільшого орієнтоване на випробування [14].

Ще одне рішення зі зниження викидів сірки – використання біопалива, яке має дуже низький рівень сірки та низькі викиди CO_2 , а тому є технічно життєздатним рішенням для палива, що відповідає вимогам VLSFO або ULSFO. Безпосередня проблема полягає в тому, що в судноплавному секторі мало знань про застосування біопалива як компонента паливних ресурсів.

Усі перелічені альтернативні види палива практично не містять сірку та можуть використовуватися розрізнено для повної заміни звичайно палива або в поєднанні зі звичайним судновим паливом на нафтовій основі, у такий спосіб покриваючи тільки частину потреби судна в енергії. Вибраний тип альтернативного палива та частка замінного звичайного палива матимуть прямий вплив на викиди судна, зокрема парникові гази, NO_x та SO_x . Однак однією загальною проблемою, яка пов'язана з прийняттям для використання більшості альтернативних видів палива, є їхні фізико-хімічні характеристики, пов'язані, як правило, з відповідними низькими точками займання, більш високою летючістю, різним вмістом енергії на одиницю маси, у деяких випадках навіть токсичністю.

Однак з огляду на те, що судноплавство сьогодні становить значну частку на світовому транспортному ринку, використання альтернативних видів палива можна розглядати як одну з найважливіших сфер технологічного розвитку сталого транспорту з безпосереднім позитивним впливом на навколишнє середовище [15; 16].

Ще однією з помітних тенденцій у «зеленому суднобудуванні» є підвищене застосування суднобудівними верфями енергозберігаючих технологій, що запобігають втратам енергії, не знижуючи при цьому ефективність суден [17]. Значний прогрес у впровадженні енергозберігаючих методик і створенні суден, які відповідають високим екологічним стандартам та скорочують викиди вуглекислого газу в атмосферу, зробили японські суднобудівники. У Японії були створені та введені в дію правила, які встановлюють межі вмісту сірки в пальному та вимагають від суден, що проходять у японських територіальних водах, використовувати двигуни, які відповідають найбільш передовим стандартам за викидами оксидів азоту і вмістом сірки. Такі зусилля привели до розроблення революційного прибережного «суперекосудна», яке побудоване з використанням високотехнологічних рішень та обладнання, оснащене електричною енергетичною установкою, що дає можливість скоротити вплив на навколишнє середовище оксидів азоту, вуглекислого газу, оксидів сірки, звукового забруднення й вібрацій. Судно має оптимальну форму корпусу та полегшуючу систему підтримки для швартування, навантаження й навігації. На цей час декілька «суперекосуден» уже знаходяться в роботі, інші ж на стадії будівництва [18].

Для посилення безпеки та екологічної нешкідливості роботи верфей у Японії також розроблені відповідні рекомендації щодо інвентаризації та екологічно безпечних практик зламу суден.

У зв'язку з введенням у дію Міжнародною морською організацією документа BWMC з дуже жорсткими вимогами до обробки баластної води (основною небезпекою використання баластної води вважається вплив на екологію за рахунок перенесення морських організмів із баластною водою з однієї екосистеми в іншу)

актуальною стає тема розроблення безбаластних (free-ballast) суден, а також суден, у проєктах яких не відмовляються повністю від використання баластної води, проте зводять її кількість до мінімуму (low-ballast).

Так, класифікаційне товариство DNV GL розробило проєкт судна з проточним баластом Triality як альтернативи системам очищення баластної води для танкерів. Такі розробки ведуться і в Японії (будівництво безбаластного судна-бункерувальника ЗПП), яка прагне зробити свою суднобудівну галузь екологічно стабільною та стійкою.

Висновки. У результаті проведеного дослідження тенденцій «зеленого судноплавства» – комплексу технологічних інновацій, які забезпечують створення та впровадження суден, обладнання й пального, що більш безпечні екологічно, – обґрунтовано раціональність проведення розробок у таких сферах:

- виготовлення та класифікації нових матеріалів і технологій із використанням композитів для корпусів суден, а також як багатофункціональних теплозвукоізоляційних матеріалів і покриттів;
- оптимізації обводів корпусів зі зміною дизайну та конструктивних особливостей судна;
- використання енергії вітру для підвищення рівня енергоефективності судна за рахунок встановлення вітрил різної конструкції;
- удосконалення та впровадження наявного досвіду щодо розроблення й використання екологічного та альтернативних видів палива, зменшення негативного впливу викидів із суден на навколишнє середовище;
- побудови «екосуден» за принципами «зеленої логістики» та введення в дію екологічно безпечних практик зламу суден, що дає змогу скоротити відходи й забруднення на всьому ланцюжку виробництва та поставок.

ЛІТЕРАТУРА

1. Индустрия 4.0: семь фактов / Siemens PLM Software. *PLM Эксперт: инновации в промышленности*. 2017. № 9. С. 34–37.
2. Скаридов А. С. «Зеленое судоходство» и проблема устойчивого использования морского транспорта. *Международное право и международные организации / International Law and International Organizations*. 2021. № 1. С. 31–45.
3. Ребрушкин М. Н., Васильев С. А., Пачурин Г. В. Повышение экологичности работы судов внутреннего и смешанного плавания. *Фундаментальные исследования*. 2012. № 6-1. С. 167–172.
4. Гуменюк Н. С., Грушин С. С. Применение композитных материалов в судостроении. *Современные наукоемкие технологии*. 2013. № 8-1. С. 116–117.
5. Мишкин С. И., Дориомедов М. С., Кучеровский А. И. Полимерные композиционные материалы в судостроении. *Новости материаловедения. Наука и техника*. 2017. № 1 (25). С. 60–70.
6. Kuperman A. M., Gorbatkina Y. A., Turusov R. A. High-strength reinforced plastics. *Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10 «Инновационная деятельность»*. 2015. № 2 (17). С. 29–42.

7. Храмушин В. Н. Исследования по оптимизации формы корпуса корабля. *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. 2003. № 1 (107). С. 50–65.
8. Францев М. Э. Проектные особенности зарубежных промысловых судов из композиционных материалов для прибрежного лова. *Судо-строение*. 2010. № 5. С. 14–18.
9. Крючков Ю. С., Перестюк И. Е. Крылья океана. Ленинград : Судостроение, 1983. 256 с.
10. Крючков Ю. С. Механика парусного судна : монография. Николаев : Степь-инфо, 2005. 40 с.
11. Иванченко А. А., Петров А. П., Живлюк Г. Е. Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов. *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. 2015. № 3 (31). С. 103–112.
12. Демидова Н. П., Марченко А. А., Онищенко О. А. Основные показатели судового топлива и их основные эксплуатационные свойства. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. 2015. № 32. С. 6–11.
13. Карпенко А. А., Копцева Е. П. Перспективы перевода судов морского и речного транспорта на альтернативные виды топлива. *Транспортное дело России*. 2017. № 3. С. 63–66.
14. Экономические предпосылки использования СПГ в качестве моторного топлива: аналитический обзор. *Транспорт на альтернативном топливе*. 2018. № 6 (66). С. 25–30.
15. Хорошев В. Г., Попов Л. Н., Гатин Р. И. Перспективы использования альтернативных видов топлива в судовых энергетических установках. *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2019. № 4 (390). С. 194–202.
16. Судовое топливо будущего. Сравнение и перспективы. URL: <https://pro-arctic.ru/18/06/2018/technology/32545>
17. Руководство по экологическим и социальным вопросам по отраслям для судостроения и судостроительных заводов / Европейский банк реконструкции и развития. 2011. URL: https://www.ebrd.com/downloads/about/sustainability/Shipbuilding_and_Shipyards_RU.pdf
18. От судоверфей к морям: зеленые тенденции в судостроении. *MaritimeZone*. 2010. URL: <https://maritime-zone.com/news/view/green-features-in-shipbuilding>

REFERENCES

1. Siemens PLM Software (2017). Industry 4.0: seven facts [Industriya 4.0: sem' faktov]. *PLM Ekspert: innovatsii v promyshlennosti – PLM Expert: Industry Innovation*, no. 9, pp. 34–37. [in Russian]
2. Skaridov, A. S. (2021). “Green shipping” and the problem of sustainable use of maritime transport [“Zelenoe sudokhodstvo” i problema ustoychivogo ispol'zovaniya morskogo transporta]. *Mezhdunarodnoe*

- pravo i mezhdunarodnye organizatsii – International Law and International Organizations*, no. 1, pp. 31–45. [in Russian]
3. Rebrushkin, M. N., Vasil'ev, S. A., Pachurin, G. V. (2012). Improving the environmental friendliness of the operation of inland and mixed navigation vessels [Povyshenie ekologichnosti raboty sudov vnutrennego i smeshannogo plavaniya]. *Fundamental'nye issledovaniya – Basic Research*, no. 6-1, pp. 167–172. [in Russian]
 4. Gumenyuk, N. S., Grushin, S. S. (2013). The use of composite materials in shipbuilding [Primenenie kompozitnykh materialov v sudostroenii]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii – Modern high technologies*, no. 8-1, pp. 116–117. [in Russian]
 5. Mishkin, S. I., Doriomedov, M. S., Kucherovskiy, A. I. (2017). Polymer composite materials in shipbuilding [Polimernye kompozitsionnye materialy v sudostroenii]. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika – Polymer composite materials in shipbuilding. News of materials science. Science and technology*, no. 1 (25), pp. 60–70. [in Russian]
 6. Kuperman, A. M., Gorbatkina, Y. A., Turusov, R. A. (2015). High-strength reinforced plastics. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 10 “Innovatsionnaya deyatel'nost'” – Bulletin of the Volgograd State University. Series 10 “Innovation”*, no. 2 (17), pp. 29–42. [in English]
 7. Khramushin, V. N. (2003). Research to optimize the shape of the ship's hull [Issledovaniya po optimizatsii formy korpusa korablya]. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk – Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, no. 1 (107), pp. 50–65. [in Russian]
 8. Frantsev, M. E. (2010). Design features of foreign fishing vessels made of composite materials for coastal fishing [Proektnye osobennosti zarubezhnykh promyslovykh sudov iz kompozitsionnykh materialov dlya pribreznogo lova]. *Sudostroenie – Shipbuilding*, no. 5, pp. 14–18. [in Russian]
 9. Kryuchkov, Yu. S., Perestyuk, I. E. (1983). Wings of the ocean [Kryl'ya okeana]. Leningrad : Sudostroenie. [in Russian]
 10. Kryuchkov, Yu. S. (2005). Mechanics of a sailing ship: monograph [Mekhanika parusnogo sudna: monografiya]. Mykolaiv : Step'-info. [in Russian]
 11. Ivanchenko, A. A., Petrov, A. P., Zhivlyuk, G. E. (2015). Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions [Energeticheskaya effektivnost' sudov i reglamentatsiya vybrosov parnikovyykh gazov]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova – Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov*, no. 3 (31), pp. 103–112. [in Russian]
 12. Demidova, N. P., Marchenko, A. A., Onishchenko, O. A. (2015). The main indicators of marine fuel and their main operational properties [Osnovnye

- pokazateli sudovogo topliva i ikh osnovnye ekspluatatsionnye svoystva]. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Kamchatka State Technical University*, no. 32, pp. 6–11. [in Russian]
13. Karpenko, A. A., Koptseva, E. P. (2017). Prospects for the transfer of sea and river transport vessels to alternative fuels [Perspektivy perevoda sudov morskogo i rechnogo transporta na al'ternativnye vidy topliva]. *Transportnoe delo Rossii – Transport business in Russia*, no. 3, pp. 63–66. [in Russian]
 14. Economic prerequisites for the use of LNG as a motor fuel: an analytical review [Ekonomicheskie predposylki ispol'zovaniya SPG v kachestve motornogo topliva: analiticheskiy obzor] (2018). *Transport na al'ternativnom toplive – Alternative fuel transport*, no. 6 (66), pp. 25–30. [in Russian]
 15. Khoroshev, V. G., Popov, L. N., Gatin, R. I. (2019). Prospects for the use of alternative fuels in ship power plants [Perspektivy ispol'zovaniya al'ternativnykh vidov topliva v sudovykh energeticheskikh ustanovkakh]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra – Proceedings of the Krylovsky State Scientific Center*, no. 4 (390), pp. 194–202. [in Russian]
 16. Marine fuel of the future. Comparison and perspectives [Sudovoe toplivo budushchego. Sravnenie i perspektivy]. Retrieved from: <https://pro-arctic.ru/18/06/2018/technology/32545> [in Russian]
 17. European Bank for Reconstruction and Development (2011). Environmental and social guidelines by industry for shipbuilding and shipyards [Rukovodstvo po ekologicheskim i sotsial'nym voprosam po otraslyam dlya sudostroeniya i sudostroitel'nykh zavodov]. Retrieved from: https://www.ebrd.com/downloads/about/sustainability/Shipbuilding_and_Shipyards_RU.pdf [in Russian]
 18. From shipyards to the seas: green trends in shipbuilding [Ot sudoverfey k moryam: zelenye tendentsii v sudostroenii] (2010). *MaritimeZone*. Retrieved from: <https://maritime-zone.com/news/view/green-features-in-shipbuilding> [in Russian]