

УДК 629.5.023
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.1\(494\).1](https://doi.org/10.15589/znp2024.1(494).1)

ANALYSIS OF THE FEATURES OF SMALL VESSELS AND DEVELOPMENT OF THE METHOD THEIR INITIAL DESIGN

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ МАЛИХ СУДЕН І РОЗРОБКА МЕТОДУ ЇХ ПОЧАТКОВОГО ПРОЕКТУВАННЯ

Oleksandr V. Bondarenko
oleksandr.bondarenko@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-6114-1322
Oleksandr I. Krotov
ORCID: 0000-0002-8813-238X
Andrii O. Krotov
andrii.krotov@nuos.edu.ua
ORCID: 0009-0000-9905-8306

О.В. Бондаренко,
канд. техн. наук, професор
О.І. Кротов,
канд. техн. наук, доцент
А.О. Кротов,
провідний фахівець
підготовчого відділення

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. Purpose. The paper considers the issue of creating a methodology for the development of projects of small vessels at the initial stage. These vessels can be widely used in various industries and spheres of society. They refer to vessels with a wide range of functions performed by them: the transportation of small batches of cargo and groups of people on external and internal raids, on rivers and lakes, as well as the functions of official – traveling vessels, vessels for fishing in inland reservoirs and coastal sea areas, carrying out diving and hydrographic work, development of the coastal shelf, fleet maintenance, etc. Therefore, the creation of a design base for these vessels and the development of projects for various purposes at the initial stage is an urgent task.

Method. Considered architecturally – the design features of small vessels for their purpose, including harbor workboats and tugboats, depending on what is given priority in the design: towing operations or transportation of people and supplies. On the basis of the analysis of the peculiarities of functioning and architectural and structural features, as well as the main dimensions, their ratios and characteristics of small vessels of various purposes, the main provisions of the methodology of their initial design are considered. The issue of technical and economic justification of the ship's project, the selection of its main elements and characteristics, taking into account the purpose, features of operation, the shape of the hull, ensuring the safety of sailing in conditions of wind and turbulence, was considered. The mentioned questions make it possible to form a mathematical model of the designed small vessel, which is a set of mathematical expressions that describe the real relationships between the main elements and characteristics of the vessel and the amount of costs, taking into account the limitations of the conditions of construction, operation, seaworthiness and operational and technical qualities.

Scientific novelty. The work deals with the creation of a methodology for the development of projects of small vessels at the initial stage, which is based on the use of mathematical modeling and optimization programs. This program is able to search for the optimal solution in two directions: a product-oriented search aimed at creating a ship as an industrial product, and a system-oriented search – taking into account the operating conditions of the ship as a complex system.

Practical significance. The main provisions of the initial design methodology considered in the work can be used in the task of choosing the optimal design solution for a small vessel from the point of view of economy and operational reliability at the initial design stage.

Key words: small ships; ship design; mathematical model; initial design; ship economy; reliability of operation.

Анотація. Мета. У роботі розглянуто питання створення методики розробки проектів малих суден на початковому етапі. Ці судна можуть знайти широке застосування в різноманітних галузях промисловості і сферах діяльності суспільства. Вони відносяться до суден з широким спектром виконуваних ними функцій: перевезення невеликих партій вантажу і груп людей на зовнішніх і внутрішніх рейдах, по ріках і озерах, а також функцій службово – роз'їзних суден, суден для лову риби у внутрішніх водоймах і прибережних морських районах, проведення водолазних і гідрографічних робіт, освоєння прибережного шельфу, обслуговування флоту тощо.

Тому створення проектної бази по цим суднам і розробка проектів різних призначень на початковій стадії є актуальною задачею.

Методика. Розглянуто архітектурно – конструктивні особливості малих суден за призначенням, в тому числі портових робочих катерів і буксирів залежності від того, чому віддається перевага при проектуванні: буксирувальним операціям або перевезенню людей і забезпечення. На основі проведеного аналізу особливостей функціонування і архітектурно-конструктивних ознак, а також головних розмірів, їх відношень і характеристик малих суден різних призначень розроблені основні положення методики їх початкового проектування. Розглянуто питання техніко-економічного обґрунтування проекту судна, вибору його основних елементів і характеристик з урахуванням призначення, особливостей експлуатації, форми корпусу, забезпечення безпеки плавання в умовах дії вітру і хвилювання. Зазначені питання дають можливість сформувати математичну модель проектного малого судна, яка являє собою сукупність математичних виразів, які описують реально існуючі зв'язки між основними елементами і характеристиками судна та розміром витрат з урахуванням обмежень за умовами побудови, експлуатації, морехідними і експлуатаційно-технічними якостями.

Наукова новизна. У роботі розглянуті питання створення методики розробки проектів малих суден на початковому етапі, яка базується на використанні математичного моделювання і програми оптимізації. Ця програма здатна здійснювати пошук оптимального рішення у двох напрямках: продукт-орієнтований пошук, направлений на створення судна як продукту промисловості, і систем-орієнтований пошук – на урахування умов експлуатації судна як складної системи.

Практична значимість. Основні положення розглянутої в роботі методики початкового проектування можуть бути використані в задачі вибору оптимального з точки зору економічності та надійності експлуатації проектного рішення малого судна на етапі початкового проектування.

Ключові слова: малі судна; проект судна; математична модель; початкове проектування; економічність судна; надійність експлуатації.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

За останній час докорінно змінилися умови використання світового флоту суден, кількісний і якісний склад, а також умови його експлуатації. На порядку денному стоїть питання створення нового флоту України, у тому числі флоту малих суден, які можуть знайти широке застосування в різноманітних галузях промисловості і сферах діяльності суспільства. Тому створення проектної бази по цим суднам і розробка проектів різних призначень є актуальною задачею. Важлива роль при цьому відводиться методиці початкового етапу проектування малих суден, питання розробки якої розглядаються у даній роботі.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Розробкам методик початкового проектування суден різноманітних типів, як транспортних, так і спеціального призначення, присвячена велика кількість досліджень і публікацій, однак для малих суден різних призначень повноцінні вітчизняні методики відсутні. В дослідженнях і публікаціях останніх років розглядалися лише окремі питання цієї тематики, що не доводилося до створення сучасного комплексу методичних розробок.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Невирішеною частиною проблеми створення проектів малих суден є відсутність методики початкового проектування малих суден. Автори роботи, яка представляється, раніше торкалися лише окремих питань

вибору архітектурно-конструктивних ознак, основних елементів і характеристик малих суден та оцінки їх морехідних якостей і створення початкової бази проектних даних цих суден. В роботі, що подається, значно доопрацьована зазначена база даних покладена в основу розробки сучасної методики початкового проектування малих суден.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження спрямоване на розробку питань створення методики проектування малих суден на початковому етапі з використанням сучасних математичних методів моделювання і пошуку оптимальних рішень.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методи дослідження, використані в роботі, поділяються на загальнонаукові та спеціальні. До загальнонаукових методів належать методи: аналізу, порівняння, синтезу. До спеціальних методів належать методи: графічної побудови числових результатів, підбору форми алгебраїчних рівнянь для встановлення залежностей у перехідних процесах, математичного моделювання процесів і оптимального пошуку рішень.

Об'єктом дослідження є процес створення методики розробки проектів малих суден на початковому етапі з використанням сучасних методів математичного моделювання і оптимізації.

Предметом дослідження є методи теорії проектування суден і теорії корабля, призначені для вибору основних

елементів і характеристик малих суден, навантаження мас, оцінювання їх морехідних якостей тощо, а також математична модель, в якій реалізуються ці методи.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Малі судна, що розглядаються нижче, – це судна, на які розповсюджуються Правила класифікації та побудови малих суден Регістру судноплавства України [1, ч. 1, с. 31] довжиною до 20 м, довжиною від 2,5 м до 24 м [3, с. 46], а також судна, які за Правилами класифікації та побудови морських суден мають довжину більше 20 м [2, ч. 1, с. 34]. Аналогічно класифікуються такі судна Правилами реєстрів провідних морських держав.

Малі судна (МС) знайшли застосування в різноманітних галузях промисловості і сферах діяльності суспільства. Виконуваними ними такі функції як перевезення вантажу невеликими партіями, груп людей на зовнішніх і внутрішніх рейдах, річках і озерах визначають призначення МС. За призначенням вони поділяються на робочі судна, службово – роз'їзні судна, судна для лову риби у внутрішніх водоймах і прибережних морських районах, для проведення водозабірних і гідрографічних робіт, освоєння прибережного шельфу, обслуговування флоту та ін. Малі судна мають широке використання у нормальному функціонуванні будь-якого порту при перевезенні на судна бригад портових робочих, суднового постачання, буксирування в межах порту, плавзасобів тощо.

Корпуси МС будуються з різноманітних матеріалів, що істотно змінює технологію і трудомісткість побудови. Вибір матеріалу для побудови корпусу МС залежить від його типу, призначення, розмірів тощо. Залежно від основного матеріалу корпусу МС є сталевими (судна водотоннажного і перехідного режимів плавання), з легкого алюмінієво – магнієвого сплаву (глісуючі судна і судна на підводних крилах), дерев'яними, склопластиковими і композитними. В залежності від режиму руху вони класифікуються за формою корпусу як круглоскулі, гостроскулі, плоскодонні, з поздовжніми і поперечними реданами, багатокорпусні, з транцевою, округлою або загостреною кормою.

Результати проведеного аналізу архітектурно – конструктивних особливостей МС показують, що навіть у рамках одного призначення, вони істотно відрізняються своїми елементами, характеристиками і конструктивними типами. Залежно від призначення і району експлуатації МС мають такі архітектурні ознаки: судна відкритого типу (безпалубні), частково запалублені з відкритим кокпітом, запалублені з рубкою, яка встановлена над палубним вирізом і кокпітом, запалублені з рубками, які встановлені на палубі. На МС застосовуються різноманітні двигуни і рушії, що значно розширює область обґрунтування їх характеристик.

Аналізуючи наведені в табл. 1 [4, табл. 2.1, с. 79] дані по МС, отримані авторами цієї роботи у рамках

науково-дослідної роботи, можна зазначити, що вони характеризуються великою різноманітністю окремих проектно-конструктивних рішень. Аналіз головних розмірів і їх відношень цих суден показує, що характерними значеннями їх ширини є 3,5–3,93 м при зміні повної водотоннажності від 11,6 т до 56,9 т, висота борту змінюється у межах 1,5–2,25 м, відносна довжина L/B – від 3,5 до 5,0. Менше значення L/B має катер пр. МРК1 відкритого типу з водотоннажністю порожнем 1,5 т (2,95) а значення відношення довжини L/B а також відношення довжини до висоти борту L/D робочих катерів пр. Р1 і пр. РМ1 є характерними для морських транспортних суден.

Зазначені діапазони зміни головних елементів і характеристики МС можуть служити обмеженнями при формуванні методики початкового проектування цих суден.

Створення проектів МС пов'язується з необхідністю розміщення в обмежених об'ємах екіпажу, пасажирів, вантажу, устаткування тощо, що впливає на зміну головних розмірів і розташування водонепроникних перебірок. Наприклад, застосування подовженої рубки і збільшення найбільшої довжини судна пр. Р1 викликало розміщення додаткового кубрика у корпусі, а розміщення машинного відділення (МВ) катера пр. Р1 в кормі в порівнянні з катером пр. РМ1 призвело до розміщення додаткового баласту для утилізації масою біля 1,4 т. Тому на початкових етапах проектування МС при розробці загального розташування виникає необхідність у проведенні ретельних перед-проектних досліджень.

Конструктивною відмінністю між зазначеними катерами є використання при з'єднанні елементів шпангоутних рам на катері пр. Р1 приставних книць, що на відміну від зварних (вузол з'єднання рамного бімса і рамного шпангоута МВ) і від книць, встановлених внапуск (на пр. РМ1 приклад з'єднання бімса зі шпангоутом на 15 шп.), мають більшу технологічність і міцність.

До групи службово-роз'їзних катерів відноситься службово – роз'їзний катер пр. СР1 та патрульний катер пр. ЛП1. Перший катер водотоннажністю 12,9 т може перевозити 12 пасажирів, які розміщуються в спеціальному пасажирському блоці, що дозволяє застосовувати його з медичним блоком як малий медичний катер швидкої допомоги (пр. ММ1, див. табл. 1). Корпус має напівбак, ходову рубку в носовій частині, МВ, яке має найбільшу масу, розміщено в районі міделя. Водотоннажність порожнем катера пр. ЛП1 становить 11,6 т, його головні розміри близькі за своїми значеннями до головних розмірів катера пр. СР1. Але ці катери відрізняються принципами руху, катер пр. СР1 водотоннажного режиму руху, а катер пр. ЛП1 – глісуючий, з водометним рушієм і головним двигуном потужністю 810 кВт. Корпус катера пр. ЛП1 вміщує службове приміщення і МВ, які мають на верхній палубі капи, а також форпик і ахтерпик.

Таблиця 1. Основні характеристики катерів різних призначень

№ з/п	Проект	Призначення	Водотоннажність, т		DW	Головні розміри, м				Відношення			
			Повна	Порожнем		L	B	D	d	L/B	L/D	B/D	D/d
1	P1	Робочий катер	56,87	35,21	20,9	20,0	3,93	2,25	1,43	5,03	8,89	1,75	1,57
2	PB1	Рейдовий водозащитний катер	43,31	36,62	6,69	20,0	3,93	2,25	1,24	5,03	8,89	1,75	1,81
3	PM1	Рейдовий робочий катер	46,64	28,98	17,7	19,0	3,80	2,15	1,27	5,00	8,84	1,77	1,69
4	PBM1	Водозащитний катер	37,75	34,07	2,68	19,0	3,00	2,15	1,11	5,00	8,84	1,77	1,94
5	PB1	Рейдовий буксир	35,14	33,68	4,47	17,4	3,60	2,30	0,96	4,08	6,39	1,57	2,44
6	PK1	Рятувальний катер	11,58	10,26	1,32	12,2	3,50	1,89	0,96	3,49	6,46	1,85	1,97
7	CP1	Службово-роз'їзний катер	14,59	12,88	1,71	13,0	3,50	1,50	0,75	3,71	8,67	1,85	2,00
8	MM1	Малий медичний катер	14,72	13,65	1,07	13,0	3,50	1,50	0,75	3,71	8,67	1,85	2,00
9	ЛП1	Патрульний катер	13,65	11,57	2,08	13,2	3,50	1,76	0,65	3,77	7,50	1,99	2,71
10	МРК1	Малий рятувальний катер	2,058	1,55	0,51	6,50	2,20	1,00	0,30	2,95	6,50	2,20	3,33

Продовження таблиці 1

№ з/п	Проект	LBD, м³	V, м³	C _b	C _p	v, вуз	N, кВт	Дальн. плав., милі	Команда, осіб	Морехідність, бали	Автономність	Непотопл.
1	P1	176,3	125,2	0,5	0,708	11,0	220	200	3	5	5 діб	один
2	PB1	176,9	125,2	0,45	0,708	11,0	220	200	8	5	5 діб	один
3	PM1	155,2	118,8	0,5	0,765	10,5	110	390	4		5 діб	один
4	PBM1	155,2	118,8	0,5	0,765	10,5	110	300	13	–	5 діб	один
5	PB1	144,1	101,5	0,58	0,704	8,6	110	–	4	4	2,5 діб	один
6	PK1	80,7	42,3	0,33	0,524	15,0	220	170	2+4	5	10 год	один
7	CP1	68,25	45,6	0,44	0,668	13,0	173	150	2	4	8 год	один
8	MM1	68,25	45,6	0,44	0,668	13,0	173	150	2+3	4	8 год	один
9	ЛП1	81,3	58,5	0,49	0,719	32,4	810	160	2+6	–	8 год	–
10	МРК1	14,3	10,34	0,54	0,723	21,6	74	54	1	–	2,5 год	носов. Відсік

Днище катера пр. ЛПІ є плоским клиновидної форми до міделя, редан знаходиться в районі міделя і далі в корму днище має форму саней. Корпус набраний по змішаній системі, а бортові перекриття – по поперечній системі. Днищове перекриття виконане по поздовжній системі оригінальної конструкції – по навісній системі, у якій поперечний набір розташовується над поздовжніми ребрами. Ділянки палуби між рубкою і лінією борту також мають поздовжню систему набору.

До службово-роз'їзних катерів відноситься також рятувальний катер пр. РК1 (табл. 1). Він відноситься до катерів із перехідним режимом руху. Його носова частина має шпангоути V-подібної форми, середня частина – більш повні U – подібні, а кормова – ділянки днища і бортів мають плоскі поверхні. МВ розташовується в міделевій частині катера, що спрощує його удиферентування, над ним на верхній палубі встановлена ходова рубка. Кубрик розміщений у носовій частині корпусу, а до корми від МВ – службове приміщення, в кінцевих частинах розміщуються форпик і ахтерпик.

Представником катерів відкритого типу з глісуючим режимом руху, є катер пр. МРК1 водотоннажністю його становить 1,6 т. Головний двигун катера розташований у кормі і передача на валопровід здійснюється через кутовий редуктор. В носовій частині обладнаний форпик. Катер набраний по поперечній системі набору і має спрощені обводи корпусу.

Незважаючи на невизначальну роль поздовжньої міцності у призначенні розмірів в'язей, що входять в еквівалентний брус МС, перевірочні розрахунки загальної міцності необхідно виконувати не тільки за умови підйому судна краном, але і при постановці на вершину хвилі з найгіршим варіантом завантаження. Це є особливо актуальним для глісуючих катерів, тому що до статичного згинального моменту від носової кінцевої частини, що вийшла з води, додається динамічна складова від удару об хвилю.

Портові робочі катери і буксири за характером своєї роботи повинні мати достатньо міцний корпус і відповідне архітектурно – конструктивне виконання, що забезпечує йому нормальну роботу при зближенні з транспортними суднами. Дуже важливою для катерів або буксирів є висока маневреність. Цим суднам необхідна також достатня остійність при буксируванні несамохідних плавзасобів.

В табл. 2 наведені основні характеристики портових робочих катерів і буксирів [4, с. 87]. Розміри цих суден в основному залежать від потужності їх енергетичної установки (ЕУ). Їх довжина при потужності до 220 кВт росте швидше, ніж в інтервалі потужності від 220 до 440 кВт. Це пояснюється тим, що кількість і розміри судових приміщень практично не змінюються з ростом потужності і довжина судна залежить тільки від довжини МВ.

В роботі [4, с. 88] рекомендується аналітична залежність довжини портових робочих катерів від потужності ЕУ у вигляді

$$L = 8,5 + \sqrt{28 \left(\frac{N_e}{73} - 1 \right)}. \quad (1)$$

Користування цією формулою можливе для ЕУ з $N_{ЕУ} \geq 150$ кВт.

Наступна формула для довжини портових робочих катерів в залежності від N_e , отримана апроксимацією по даним табл. 2, має вигляд:

$$L = 9,383 \cdot \ln(N_e) - 33,5. \quad (2)$$

Аналіз даних табл. 2 показує, що відношення ширини до осадки B/d портових катерів і буксирів дорівнює 2,5–3,2, яке зростає у катерів з малою осадкою. Так за умов розміщення ЕУ і судових приміщень таких катерів відношення B/d може зростати більше 4,0.

Для визначення ширини судна B і осадки d від довжини L можна рекомендувати наступні формули, отримані по статистичних даних в табл. 2:

$$B = 0,261 \cdot L + 1,126; \quad (3)$$

$$d = 0,1025 \cdot L + 0,378. \quad (4)$$

З метою підвищення морехідності портових катерів і буксирів при виході в прибережну морську зону і для забезпечення достатньої висоти для розміщення і обслуговування ЕУ їх висота надводного борту вибирається з запасом. Відношення висоти борту до осадки D/d звичайно дорівнює від 1,5 до 1,9 для катерів потужністю до 200 кВт і зменшується до 1,2–1,3 при потужності 440 кВт (табл. 2). На катерах меншої потужності, які використовуються переважно в захищених акваторіях, передбачають мінімальний надводний борт, а зручність обслуговування і розміщення ЕУ забезпечується за допомогою капів, розташованих над МВ.

Для відношення висоти борту до осадки катера з мінімальним надводним бортом $(D/d)_{\min}$ і надлишковим бортом $(D/d)_{\max}$, апроксимацією даних табл. 2 отримані наступні формули:

$$(D/d)_{\min} = -0,0011 \cdot N_e + 1,424. \quad (5)$$

$$(D/d)_{\max} = -0,0012 \cdot N_e + 1,812 \quad (6)$$

Наведені в табл. 2 відношення кубічного модуля до потужності енергетичної установки LBD/N_e , $\text{м}^3/\text{кВт}$, може служити параметром, який характеризує раціональність вибраних головних розмірів МС. Значення цього показника змінюється від 0,45 $\text{м}^3/\text{кВт}$ при потужності 75 кВт до 0,70 $\text{м}^3/\text{кВт}$ при потужності 445 кВт.

Залежність відношення LBD/N_e від потужності ЕУ, отримана апроксимацією даних табл. 2, має вигляд:

$$(LBD) / N_e = 0,0005 N_e + 0,3968, \text{ м}^3/\text{кВт}. \quad (7)$$

Таблиця 2. Основні характеристики портових робочих катерів і буксирів

Найменування катера	Потужність ЕУ, кВт	Водотоннажність, т	Головні розміри, м				LBD, м3	Співвідношення головних розмірів			Швидкість, вуз	Тяга Z ₀ , тс	Питома кубатура LBN/N _e , м ³ /кВт
			L _{гц}	B	D	d		L _{гц} /B	B/d	D/d			
Гаветек	52	–	10,70	3,46	1,60	0,95	59	3,10	3,65	1,69	7,0	0,95	1,14
Метис Оттон	79	10,4	8,63	2,92	1,93	1,06	49	2,96	2,75	1,83	9,0	1,60	0,62
Геральд	79	22,0	13,10	3,80	1,60	0,90	80	3,45	4,22	1,78	8,0	1,16	1,01
Вальдемар	96	8,5	8,40	3,10	1,70	1,30	44	2,70	2,38	1,30	9,0	2,10	0,46
Прибережний	110	33,0	14,00	3,80	1,90	1,40	101	3,68	2,72	1,35	9,0	1,00	0,92
КЖ	110	40,9	16,16	3,80	2,16	1,39	133	4,25	2,73	1,56	9,4	1,20	1,21
Ессо Джебел	125	–	10,80	3,65	2,20	1,22	87	2,96	2,99	1,81	8,9	–	0,69
Жаннет	132	–	12,80	3,66	1,67	1,36	78	3,50	2,70	1,24	8,7	2,35	0,59
Марк 1	140	22,0	10,00	4,20	1,90	0,92	80	2,48	4,57	2,06	8,5	3,00	0,57
Буран	165	34,0	13,30	3,96	2,00	1,35	105	3,36	2,93	1,48	9,5	3,20	0,64
Спарн Форг	167	–	11,90	4,10	2,10	1,80	102	2,90	2,28	1,17	10,0	2,70	0,61
Бизон	176	–	15,00	5,00	2,30	1,40	172	3,00	3,57	1,64	9,3	3,57	0,98
Казимерж	220	–	17,01	6,90	2,40	1,70	282	2,47	4,05	1,41	9,5	4,00	1,28
Пауль	220	–	14,77	4,57	2,21	1,98	149	3,22	2,30	1,11	8,5	4,75	0,68
Портовий	220	50,0	18,00	4,00	2,00	1,43	144	4,50	2,80	1,40	10,5	2,80	0,65
Хуго Ленц	224	–	15,97	4,56	2,64	1,90	192	3,50	2,40	1,39	10,0	–	0,86
Пейок ТВ №1	240	–	16,00	5,48	2,70	1,83	237	2,92	3,00	1,47	10,0	3,50	0,99
Пінгвін	268	–	13,70	4,60	2,60	1,70	164	2,98	2,70	1,53	10,0	3,75	0,61
Джарма	272	–	19,80	5,81	2,60	2,00	299	3,4	2,90	1,30	10,0	3,00	1,10
Амстель	287	–	21,00	5,80	2,70	2,00	329	3,62	2,90	1,35	10,3	6,00	1,15
Один	294	–	23,70	7,00	2,66	2,10	441	3,39	3,34	1,27	10,0	5,00	1,50
Аполло	360	–	17,20	5,80	3,00	2,60	299	2,96	2,23	1,15	10,0	8,75	0,83
Ескорт	367	–	20,5	6,70	3,26	2,58	448	3,06	2,60	1,25	10,5	8,20	1,22
Дюк оф Норманди	415	–	20,00	7,00	2,90	2,60	406	2,86	2,69	1,12	10,7	8,50	0,98

Вихідною величиною при проектуванні всіх суден буксирного класу є, як правило, потужність ЕУ, що є функцією тяги, яку хоче отримати судновласник. Крім того, вихідною величиною для вибору потужності може служити також необхідна швидкість вільного ходу судна.

Залежність тяги на швартовах Z_0 від потужності ЕУ N_e (табл.2) портових робочих катерів і буксирів у межах 70 – 220 кВт виражається прямою лінією, а при зростанні значень потужності, коли розміри і осадка суден збільшуються, вона зростає.

Для визначення потужності N_e в залежності від Z_0 можна скористатися формулою, отриманою апроксимацією даних табл. 2:

$$N_e = 62.2 \cdot Z_0^{0.889}. \quad (8)$$

Потужність ЕУ робочих катерів і буксирів у випадку, коли задається швидкість вільного ходу, може бути визначена за допомогою методів, неведених у роботах [5, 6].

Аналіз особливостей розрахунку навантаження мас на початкових стадіях розробки проекту МС показує, що ступінь розбивки навантаження на укрупнені складові є характерною у тому, що відносні частки складових мас мають приблизно один порядок (табл. 3) [4, табл. 2.5, с. 140]. Дані цієї таблиці можуть служити для орієнтовної оцінки складу навантаження МС у першому наближенні.

Виходячи з рекомендацій авторів низки робіт з проектування суден, склад навантаження МС приймається наступний: P_k – корпус; $P_{об}$ – обладнання; P_c – системи; $P_{мех}$ – механізми; $P_{ел}$ – електрообладнання; $P_{зб}$ – забезпечення; $P_{ек}$ – екіпаж, провізія, вода; $P_{п}$ – паливо; $P_{вн}$ – вантаж;

Для розрахунку складових водотоннажності МС пропонуються за рекомендаціями авторів робіт з проектування суден такі залежності:

$P_k = q_k C_b^{1/3} L^{4/3} (B+D)$; $P_{об} = q_{об} (LBD)^{2/3}$; $P_c = q_c LBD$; $P_{ек} = q_{ек} n_{ек} + A n_{ек} q_{пр}$; $P_{мех} = q_{мех} N$; $P_{ел} = q_{ел} LBD$; $P_{зб} = q_{зб} (LBD)^{2/3}$; $P_{п} = q_{п} \frac{L_{пл}}{v_s} N$, в яких вимірники наступні: q_k – маси корпусу; $q_{об}$ – маси обладнання; q_c – маси систем; $q_{мех}$ – маси механізмів; $q_{ел}$ – маси електрообладнання; $q_{зб}$ – маси забезпечення; $q_{п}$ – маси палива; L – довжина судна, м; B – ширина судна, м; D – висота борту, м; C_b – коефіцієнт загальної повноти; v_s – швидкість руху, вузли; $L_{пл}$ – дальність плавання, милі; N – потужність ЕУ, кВт; $n_{ек}$ – кількість членів екіпажу; A – автономність, доби; $q_{ек}$ – маси члена екіпажу, кг; $q_{пр}$ – маси провізії в добу, кг; q_v – маса води, кг.

Для розрахунку вимірників мас МС зазначених типів в роботі [4, с. 186] були оброблені дані по 63 судах і отримані графічні залежності, які дозволяють з достатньою для початкової стадії (відносна похибка 0,7–12 % для різноманітних складових) визначати ці складові і повну водотоннажність.

Таблиця 3. Характерний склад навантаження малих суден деяких типів, %

Найменування статті навантаження	Робочі	Водолазні	Буксирні	Службово-роз'їзні	
				сталь	АМГ
Металевий корпус	20,6 є	28 є	34,0 є	35,5 є	18,0 є
Надбудови	25 є	3,3 є	2,7 є	3,2 є	0,06 є
фундаменти	2,0 є	2,5 є	3,5 є	2,7 є	0,3 є
Неметалеві частини корпусу	7,0 є	7,0 є	5,3 є	6,5 є	4,0 є
Виробні речі	2,7 є	3,3 є	4,2 є	3,2 є	2,6 є
Рульовий пристрій	0,7 є	1,0 є	1,3 є	1,1 є	1,5 є
Якірний пристрій	1,4 є	2,0 є	1,5 є	0,8 є	0,2 є
Інші судові пристрої	1,6 є	1,7 є	4,5 є	0,2 є	0,4 є
Суднові системи	2,3 є	9,8 є	7,9 є	1,5 є	0,6 є
Енергетична установка	5,0 є	8,1 є	7,8 є	22,0 є	24,6 є
Електрообладнання	3,6 є	4,4 є	8,3 є	4,6 є	4,3 є
Баласт	0,6 є	0,3 є	–	–	–
Забезпечення	1,3 є	5,0 є	2,0 є	0,8 є	1,8 є
Вантаж	30,1 є	–	4,0 є	2,2 є	3,9 є
Пальне	2,9 є	3,7 є	5,9 є	3,3 є	2,8 є
Обладнання приміщень	2,4 є	3,5 є	1,9 є	2,0 є	2,2 є
Екіпаж	2,3 є	5,5 є	2,3 є	1,5 є	2,2 є

В результаті статистичної обробки зазначених графіків отримані наступні аналітичні залежності вимірників мас.

Залежності вимірника маси корпусу МС:

– сталевий корпус

$$q_k = 0,1 C_b^{1/3} L^{4/3} (B+D) + 32,58, \text{ для } C_b^{1/3} L^{4/3} (B+D) = 7 - 270; \quad (9)$$

– корпус з АМГ

$$q_k = 0,30 C_b^{1/3} L^{4/3} (B+D) + 10,8, \text{ для } C_b^{1/3} L^{4/3} (B+D) = 5 - 150; \quad (10)$$

– з пластика

$$q_k = 0,0116 C_b^{1/3} L^{4/3} (B+D) + 26,35, \text{ для } C_b^{1/3} L^{4/3} (B+D) = 5 - 150; \quad (11)$$

– дерев'яний корпус

$$q_k = 0,5 C_b^{1/3} L^{4/3} (B+D), \text{ для } C_b^{1/3} L^{4/3} (B+D) = 5 - 150. \quad (12)$$

Залежності вимірника маси систем МС:

– робочих і службово-роз'їзних

$$q_c = 2,2, \text{ для } LBD = (10 - 60); \quad (13)$$

$$q_c = 0,615 \cdot 1,173(LBD/10), \text{ для } LBD \geq 60; \quad (14)$$

– водолазних і рятувальних

$$q_c = 2,721 \cdot 1,145(LBD/10), \text{ для } LBD \geq 60. \quad (15)$$

Залежності вимірника маси обладнання:

– сталений корпус

$$q_{об} = 53,35 \cdot 1,056 (LBD)^{2/3}, \text{ для } (LBD)^{2/3} = (10 - 35); \quad (16)$$

– корпус з АМГ

$$q_{об} = 51,39 \cdot 1,077 (LBD)^{2/3}, \text{ для } (LBD)^{2/3} = (5 - 20); \quad (17)$$

– дерев'яний корпус

$$q_{об} = -12,84 \cdot (LBD)^{2/3}, \text{ для } (LBD)^{2/3} = (3 - 10). \quad (18)$$

Залежності вимірника маси електрообладнання МС:

– всі типи суден

$$q_{ел} = 1,57 \ln(LBD) + 3,9, \text{ для } LBD = (10 - 90); \quad (19)$$

$$q_{ел} = 0,032 \cdot (LBD), \text{ для } LBD \geq 90; \quad (20)$$

– для гідрографічних і патрульних

$$q_{ел} = 0,037 \cdot (LBD), \text{ для } LBD = (30 - 100). \quad (21)$$

Залежності вимірника маси механізмів МС:

– сталений корпус

$$q_m = 521,3 N^{-0,756}, \text{ для } N = 100 - 300; \quad (22)$$

– корпус з АМГ і дерева

$$q_m = 24,31 N^{-0,346}, \text{ для } N = 70 - 800; \quad (23)$$

– корпус з пластика

$$q_m = -0,003 N + 7,55. \quad (24)$$

Залежності вимірника маси забезпечення МС:

– робочих і службово-роз'їзних

$$q_3 = 0,611(LBD)^{2/3} + 7,303, \text{ для } (LBD)^{2/3} = (5 - 38); \quad (25)$$

– водолазних і рятувальних

$$q_3 = 0,5 (LBD)^{2/3} + 32, \text{ для } (LBD)^{2/3} = (24 - 32). \quad (26)$$

При визначенні водотоннажності порожнем D_0 та маси її складових (обладнаного корпусу $P_{ко}$, металевго корпусу $P_{мк}$, механізмів P_m) для портових робочих катерів і буксирів можна скористатися співвідношеннями:

$$D_0/LBD = 240 - 300 \text{ кг/м}^3; P_{ко}/LBD = 200 - 235 \text{ кг/м}^3; \\ P_m/N_{ЕУ} = 13 - 25 \text{ кг/кВт}.$$

У сучасній практиці проектування окремих видів суден вибір архітектурно-конструктивного типу суден і визначення їх головних елементів і характеристик включає етапи обґрунтування перспективного типового ряду суден і конкретне проектування суден. На кожному етапі отримується необхідний обсяг інформації про судно, що дає можливість підвищити оптимальність вибраних характеристик судна, що проектується.

Однак оптимальність таких характеристик часто носить умовний характер, тому що вона залежить від точності встановлення взаємозв'язків між такими різними факторами, як призначення, обсяг, умови роботи судна. Точність урахування факторів визначення характеристик судна, у великій мірі залежить також від обсягу обчислювальної роботи і рівня використовуваного математичного апарату. Впровадження математичного моделювання і використання методів оптимізації у даному випадку може суттєво підвищити ступінь оптимальності характеристик суден.

Задача вибору кращого проектного рішення з його можливих варіантів розв'язується на основі критерія оптимальності, що однозначно характеризує рівень досконалості і ефективності порівнюваних рішень. Вибір критерія оптимальності і побудова математичної моделі (ММ) є однією з головних проблем аналізу таких рішень.

При виборі критерія оптимальності задачі проектування МС враховується, що вона повинна відповідати таким основним вимогам: забезпечувати вибір кращого варіанта за показниками економічності; бути адекватною умовам і рівню задачі, яка розв'язується, а також відповідною її інформаційній базі, простою, логічною за змістом і зручною у використанні.

Конкретним вираженням цих вимог може служити використання як такого критерія показника витрат по судну. Цей показник дозволяє відбирати до реалізації такі рішення, які у своїй сукупності забезпечать найбільшу економічну ефективність судна.

При пошуку оптимальних рішень на початкових стадіях найбільш прийнятним може бути підхід, при якому вартість побудови судна і експлуатаційні витрати можуть бути достатньо точно визначені, якщо відомі значення параметрів, такі як зазначені вище вихідні дані і наступні проектні змінні: коефіцієнт загальної повноти, довжина, ширина, висота борту, осадка.

В цьому випадку проектуване МС може бути представленим ММ у вигляді сукупностей математичних виразів – рівнянь, нерівностей тощо, які описують реально існуючі зв'язки між основними елементами і характеристиками судна та розміром витрат з урахуванням обмежень за умовами побудови, експлуатації, по морехідним і експлуатаційно-технічним якостям.

Практика показує, що точного математичного опису МС на початкових стадіях проектування добитися неможливо, особливо тому, що до розрахунків долучаються емпіричні формули і статистичний матеріал. У зв'язку з цим ММ судна найчастіше носить наближений характер. Крім того, при її реалізації розрахунки складових навантаження і маси порожнього судна, опору води, описані вище, а також розрахунки критерію економічної ефективності і оптимізаційні розрахунки є досить складними. Тому впровадження математичних методів, математичного моделювання і використання

методів оптимізації дозволяє суттєво підвищити ступінь оптимальності характеристик суден.

Задача оптимізації елементів в традиційній постановці на прикладі робочого катера може бути сформульована наступним чином.

Встановлюється вектор елементів оптимізованих судна $X = \{X_i\}$, $i(1, n)$ і вектор початкових даних $P = \{P_k\}$, $k(1, s)$. Економічна ефективність судна обчислюється за допомогою критерію ефективності – функції $f(X, P)$, а його якості описуються функціями $g_j(X, P)$. Елементи і характеристики судна визначаються такими, що задовольняють наступним умовам: критерій економічної ефективності приймає найменше (найбільше) значення $f(X, P) \rightarrow \min (\max)$; виконуються вимоги до якостей судна, які містяться у завданні на проектування (початкові дані) і в нормативних документах $g_j(X, P) \geq b_j$, $j = (1, m)$; значення елементів і характеристик лежать у допустимих межах $(X_i)_{\max} \geq X_i \geq (X_i)_{\min}$.

При вирішенні задачі оптимізації елементів робочого катера початковими даними можуть бути: вантажопідйомність; швидкість або потужність ЕУ; найбільша допустима осадка; найбільша розрахункова ширина корпусу; мінімальний питомий навантажувальний об'єм; тип вантажу, який перевозиться; необхідні характеристики судна-прототипу; характеристики лінії експлуатації (габарити шляху, термін навігації, протяжність лінії, хід у вантажі і порожнем, норми вантажних робіт тощо).

Елементами робочого катера, оптимальні значення яких, при заданих вантажопідйомності, швидкості або потужності, максимально допустимих значень ширини і осадки потрібно знайти, можна приймати, наприклад, коефіцієнт загальної повноти відношення довжини до ширини і висоти борту до осадки.

Слід зазначити, що для МС з його великим переліком виконуваних різноманітних функцій критерій економічної ефективності при виборі оптимальних головних елементів і характеристик не може бути визначальним однозначно. Для цих суден потрібно доповнювати економічний критерій оптимального пошуку розрахунками їх функціонування з урахуванням різноманітних експлуатаційних умов, надійності і безпеки [7, с. 11].

Ці розрахунки можуть проводитися з використанням сучасного методу вибору головних розмірів судна, що ґрунтується на моделюванні процесу виконання його основних функціональних операцій у заданому районі експлуатації. Моделювання реалізується з використанням моделей інженерних та морехідних якостей судна та моделей його функціонування за призначенням. При побудові моделей використовуються сучасні методи гідроаеродинаміки судна та теорії випадкових функцій. Також моделюється місце

існування судна, враховуються можливості портів та інших служб забезпечення його життєдіяльності, включаючи утилізацію після закінчення терміну експлуатації [7, с. 19].

Вибір оптимального варіанта проектного рішення здійснюється на етапі ескізного проектування судна з погляду його економічності та надійності і безпеки з використанням програми оптимізації кафедри теорії і проектування Національного університету кораблебудування [7, с. 53].

При пошуку оптимального рішення в програмі здійснюються два напрямку пошуку: продукт-орієнтований пошук, направлений на створення судна як продукту промисловості, і систем-орієнтований пошук рішення, направлений на урахування умов експлуатації судна як складної системи [7, с. 32].

При продукт-орієнтованому проектуванні визначаються витрати на побудову судна. При цьому використовуються дані про розділи робіт з побудови судна та відповідні величини мас ESWBS (Empirical Ship Work Breakdown System), а також дані про розподіл системи оцінки відповідних цін ECER (Empirical Cost Estimate Relations), отримані за допомогою обробки статистичних даних за даними суден [7, с. 31].

Головною метою систем-орієнтованого проектування є знаходження розмірів і характеристик судна – за розумними витратами на стадіях виробництва, підтримки життєдіяльності та функціональності, що має найкращу ефективність у зазначених умовах періоду активного використання судна [7, с. 34].

ВИСНОВКИ

Викладені в роботі матеріали, отримані на основі аналізу архітектурно-конструктивних ознак різних типів МС за призначенням, за конструктивними особливостями, а також аналізу головних елементів і характеристик, навантаження мас тощо, дають можливість сформувати ММ розробки варіанту проекту МС. В ММ можуть бути використані отримані аналітичні залежності для довжини (1), (2), ширини і осадки (3), (4), їх відношень (5), (6), а також формули для визначення складових навантаження мас і отриманих апроксимацією їх вимірників – (9) – (26) та ін. Ця ММ може бути використана в задачі вибору оптимального варіанту проектного рішення МС на етапі початкового проектування з погляду його економічності та надійності з використанням програми оптимізації, яка здійснює пошук оптимального рішення у двох напрямках: продукт-орієнтований пошук, направлений на створення судна як продукту промисловості, і систем-орієнтований пошук – на урахування умов експлуатації судна як складної системи.

REFERENCES

- [1] Registr sudnoplavstva Ukrainy. (2005). *Pravyla klasyfikazii ta pobudovy malych suden* [Rules for the classification and construction of small vessels]. *Registr sudnoplavstva Ukrainy*.

- [2] Registr sudnoplavstva Ukrainy. (2012). *Pravyla klasyfikazii ta pobudovy morskyykh suden* [Rules for the classification and construction of sea vessels]. *Registr sudnoplavstva Ukrainy*.
- [3] Registr sudnoplavstva Ukrainy. (2020). *Zagalni pologennia klasyfikaziynoi ta isshoi dialnosti. Pravyla klasyfikazii ta pobudovy suden*. [General provisions of classification and other activities. Rules of classification and construction of ships]. *Tchastyna 1 «Klasyfikazia»*.
- [4] Krotov, O. I., Holikov, V. I., Eganov, O. Y., & Bondarenko, O. V. (2003). *Proektuvannia malotonnazhnykh suden*: [Design of small tonnage vessels]: *Navchalnyi posibnyk*. UDMTU.
- [5] Oortmerssen G. Van. (1971). A power prediction method and its application to small ships. *International Shipbuilding Progress*, 18(207), 397–415.
- [6] Holtrop, J. (1984). A statistical reanalysis of resistance and propulsion data. *International Shipbuilding Progress*, 31(363), 272–276.
- [7] Nekrasov, V. (2019). *Conceptual Designing of Ships: monograph*. Oldi-Plus.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Регістр судноплавства України. (2005). *Правила класифікації та побудови малих суден*. Регістр судноплавства України.
- [2] Регістр судноплавства України. (2012). *Правила класифікації та побудови морських суден*. Регістр судноплавства України.
- [3] Регістр судноплавства України. (2020). *Загальні положення класифікаційної та іншої діяльності. Правила класифікації та побудови суден. Частина 1 «Класифікація»*.
- [4] Кротов, О. І., Голіков, В. І., Єганов, О. Ю., & Бондаренко, О. В. (2003). *Проектування малотоннажних суден: Навчальний посібник*. УДМТУ.
- [5] Oortmerssen G. Van. (1971). A power prediction method and its application to small ships. *International Shipbuilding Progress*, 18(207), 397–415.
- [6] Holtrop, J. (1984). A statistical reanalysis of resistance and propulsion data. *International Shipbuilding Progress*, 31(363), 272–276.
- [7] Nekrasov, V. (2019). *Conceptual designing of ships: monograph*. Oldi-Plus.

© Бондаренко О. В., Кротов О. І., Кротов А. О.
Дата надходження статті до редакції: 07.02.2024
Дата затвердження статті до друку: 19.02.2024