

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Навчально науковий інститут кораблебудівний

Кафедра _____ теорії та проектування суден _____

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри



В.О. Некрасов

« 19 » 12 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

на тему: « Концептуальне проектування балкера

вантажопід'ємністю 51000 т з допоміжною вітроенергетичною
установкою»

Виконав: студент групи 6112м

Джугла Д.В.

(підпис)



Керівник роботи:

канд. техн. наук, доцент

(посада, науковий ступінь, вчене звання)

Пашенко ЮМ.

(підпис)



Миколаїв-2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМИРАЛА МАКАРОВА

Навчально науковий інститут (факультет) кораблебудівний
Кафедра Теорії та проектування суден
Спеціальність 135 Суднобудування
Освітня програма Кораблі та океанотехніка

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми
к.т.н. доц. Ю.М. Пащенко

“ 1 ” вересня 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

студенту Джулі Дмитру В'ячеславовичу

(Прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Концептуальне проектування балкера вантажопід'ємністю 51000 т. з допоміжною вітроенергетичною установкою.

Науковий керівник роботи Пащенко Ю.М., к.т.н. доцент

(Прізвище, ім'я, по батькові, наукова ступень, звання)

Затверджена наказом ректора НУК від " " 2025 року

2. Термін виконання студентом 15.12.2025 року

3. Вихідні дані по роботі:

Довжина району експлуатації 3600 миль, Автономність 15 діб, Екіпаж 20 чоловік, Морехідність 8 балів, Швидкість 15 вузл. Тип силової установки – дизель, Кількість двигунів - 1, Транспортний вантаж - насипний (вугілля),
Порти експлуатації: Баликпапан, Індонезія – Шеньчжень, Китай.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належать бути розробленими):

4.1. Вибір основних елементів судна, що проектується.

4.1.1. Класифікація світового флоту балкерів.

4.1.2. Аналіз методів вибору основних елементів балкера.

4.1.3. Продукт-орієнтоване проектування балкерів.

4.1.3.1 Розширена система структурного підрозділу суднобудівних робіт - система ESWBS.

4.1.3.2 Формування CER для будівництва балкера.

4.1.3.3. Визначення вартості робіт з проектування і побудови балкера.

4.1.4 Систем-орієнтоване проектування балкера на інтервалах часу його ефективного використання.

4.1.4.1. Моделі віртуальних просторів експлуатації балкера.

4.1.4.2 Модель інженерно-навігаційних властивостей балкера.

- 4.1.4.3 Модель експлуатації балкера.
 4.1.4.3.1 Імовірнісні характеристики надійності балкера.
 4.1.4.3.2 Імовірнісні характеристики ефективності балкера.
 4.1.4.3.3 Складні показники ефективності та надійності балкера.
 4.1.5. Постановка задачі оптимізаційного вибору основних розмірів балкера.
 4.1.6. Опис алгоритму вирішення задачі оптимізації.
 4.1.7. Програмний комплекс для вирішення задачі оптимізації.
 4.1.8. Концептуальний проєкт балкера.

4.2. Дослідження морехідних якостей проєктного рішення балкера.

- 4.2.1. Формування теоретичної поверхні балкера.
 4.2.2. Розрахунки статички (елементів теоретичного креслення).
 4.2.3. Розрахунок остійності при великих кутах нахилу.
 4.2.4. Розрахунок ходовості балкера.

5. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультантів	Підпис, дата			
		Завдання видано		Завдання прийнято	
4.1	Некрасов В.О., проф.		1.09.2025		05.11.2025

6. Дата видачі завдання 1.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів дипломного проєктування	Термін виконання етапів роботи	Примітка
4.1.	Вибір основних елементів судна, що проєктується.		
4.1.1.	Класифікація світового флоту балкерів	17.09.2025	
4.1.2.	Аналіз методів вибору основних елементів балкера	24.09.2025	
4.1.3.	Продукт-орієнтоване проєктування балкера	30.09.2025	
4.1.4.	Систем-орієнтоване проєктування балкера	07.10.2025	
4.1.5.	Постановка задачі оптимізаційного вибору основних розмірів	14.10.2025	
4.1.6.	Опис алгоритму вирішення задачі оптимізації	21.10.2025	
4.1.7.	Програмний комплекс для вирішення проблеми оптимізації	28.10.2025	
4.1.8.	Приклад дослідницького проєкту	05.11.2025	
4.2.	Дослідження морехідних якостей судна		
4.2.1.	Формування теоретичної поверхні балкера	12.11.2025	
4.2.2.	Розрахунки статички (елементів теоретичного креслення)	24.11.2025	
4.2.3.	Розрахунок остійності при великих кутах нахилу	01.12.2025	
4.2.4.	Розрахунок ходовості балкера	06.12.2025	

Студент _____
(підпис)

Джула Д.В.
(Прізвище та ініціали)

Науковий керівник _____

Пащенко Ю.М.

АНОТАЦІЯ

У даній роботі відповідно до завдання кафедри теорії та проектування суден виконано дослідження двох ключових етапів створення балкера – концептуального (оптимізаційного) та технічного проектування для експлуатації на міжнародній лінії Балікпапан (Індонезія) – Шеньчжень (Китай).

У межах концептуального проекту сформовано математичні моделі експлуатації судна та його інженерно-навігаційних характеристик, необхідних для оцінювання роботи балкера в умовах змінних вітрових і хвильових впливів Південно-Китайського моря. Проведено моделювання функціональних операцій, визначено показники ефективності та надійності, а також розв'язано оптимізаційну задачу вибору основних розмірів судна за критерієм максимального прибутку протягом життєвого циклу.

У результаті оптимізації визначено параметри балкера вантажопідйомністю приблизно 51 000 т, що забезпечують найкращі економічні показники на заданому маршруті. На етапі технічного проектування створено клас-проект, який відповідає вимогам класифікаційного товариства та забезпечує нормативний рівень остійності, ходовості та експлуатаційної безпеки.

Побудовано 3D-модель корпусу в середовищі Maxsurf, виконано розрахунки плавучості, остійності та ходовості. Гребний гвинт спроектовано у HydroComp PropCad. Додатково проаналізовано доцільність застосування трьох роторних вітрил Norsepower ($H = 28$ м, $D = 4$ м). Проведено розрахунок економії пального за двома сценаріями – без WAPS та із використанням роторів, із детальним врахуванням умов вітру вздовж маршруту та зміни потрібної потужності головного двигуна. Отримані результати дозволяють оцінити ефективність запропонованого технічного рішення та підтверджують доцільність застосування роторних вітрил у заданих умовах експлуатації.

Ключові слова:

балкер; оптимізація основних розмірів; енергоефективність судна; гребний гвинт; роторні вітрила; вітроасистований рух.

					24. МР.135. 6112м.04.П300	Арк.
						4
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

ABSTRACT

This thesis presents the results of conceptual (optimization) and technical design stages performed for a bulk carrier intended for operation on the international route Balikpapan (Indonesia) – Shenzhen (China).

Within the conceptual design stage, mathematical models of the vessel's operational profile and its engineering-navigation characteristics were developed to assess performance under the wind and wave conditions of the South China Sea. Functional operations were simulated, efficiency and reliability indicators were evaluated, and an optimization problem was solved to determine the main ship dimensions based on the criterion of maximum life-cycle profit.

The optimization process resulted in defining the parameters of a bulk carrier with a deadweight of approximately 51,000 tons, ensuring optimal economic performance on the specified route. During the technical design stage, a class-approved design was developed that meets classification society requirements for stability, seakeeping and operational safety.

A 3D hull model was created in Maxsurf, and hydrostatics, stability and powering analyses were carried out. The propeller was designed in HydroComp PropCad. Additionally, the feasibility of integrating three Norsepower rotor sails ($H = 28$ m, $D = 4$ m) was evaluated. Fuel-saving calculations were performed for two scenarios — without WAPS and with rotor sails — with detailed consideration of wind conditions along the route and resulting changes in required engine power. The obtained results demonstrate the efficiency of the proposed technical solution and confirm the practical benefits of rotor-sail assistance for the selected operating region.

Keywords:

bulk carrier; optimization of main dimensions; ship energy efficiency; marine propeller; rotor sails; wind-assisted propulsion.

					24. MP.135. 6112M.04.П300	Арк.
						5
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

1. Вступ.....	9
1.1 Балкери та їх роль у сучасному судноплавстві.....	9
1.2 Класифікація сучасних балкерів.....	11
1.3 Конструкція сучасних балкерів.....	14
1.4 Ринок вантажоперевезень балкерним флотом.....	16
1.5 Сучасні тенденції у розвитку балкерного флоту.....	18
1.6 Впровадження «зелених» технологій у сучасний балкерний флот.....	20
2. Аналіз методів вибору основних елементів балкера.....	24
3. Продукт-орієнтовне проектування балкера.....	29
3.1 Розширена система структурного підрозділу суднобудівних робіт.....	29
3.2 Формування CER для будівництва балкера.....	30
3.3 Визначення вартості робіт з проектування і побудови балкера.....	33
4. Системно-орієнтовне проектування балкера на інтервалах його ефективного використання.....	38
4.1 Моделі віртуальних просторів експлуатації балкера.....	38
4.2 Модель інженерно-навігаційних властивостей балкера.....	45
4.3 Модель експлуатації балкера.....	47
4.4 Постановка задачі оптимізаційного вибору основних розмірів балкера.....	52
4.5 Опис алгоритму вирішення задачі оптимізації.....	55
4.6 Програмний комплекс для вирішення задачі оптимізації.....	57
4.7 Концептуальний проєкт балкера.....	59
5. Дослідження морехідних якостей проєктного рішення балкера.....	67
5.1 Формування теоретичної поверхні балкера.....	67
5.2 Розрахунки статички (елементи теоретичного креслення).....	67
5.3 Розрахунок остійності при великих кутах нахилу.....	70
5.4 Розрахунок остійності судна в пошкодженому стані.....	77
5.5 Розрахунок ходовості балкера.....	79
5.6 Підбір гвинта для балкера.....	83

6. Розрахунок економії пального.....	85
6.1 Теоретичні відомості щодо використання роторів Флеттнера на балкері.....	86
6.2 Оцінювання економії пального на переході з урахуванням роботи роторів Флеттнера.....	89
6.3 Розрахунок витрат палива для базового сценарію (без роторних вітрил).....	91
6.4 Оцінка економії палива від застосування роторних вітрил.....	92
6.5 Грошова економія на паливі.....	97
7. Висновок.....	99
8. Список літератури.....	100

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.01			
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата				
					Вступ	Літ	Аркуш	Аркушів
Студент	Джула Д. В.					у	8	15
Консульт.	Пащенко Ю.М.					НУК імені адм. Макарова		
Керівник	Пащенко Ю.М.							
Зав. каф.	Некрасов В.О.							

1. Вступ.

1.1 Балкери та їх роль у сучасному судноплаванні.

Балкерний флот у сучасному світі відіграє винятково важливу роль, оскільки саме він забезпечує перевезення основних видів масових вантажів.

Глобальна економіка функціонує завдяки безперервному руху потоків сировини між континентами, і саме балкери створюють матеріальну основу цієї взаємозалежності.

Становлення балкерного флоту пов'язане з об'єктивною потребою перевезення великих обсягів однорідних вантажів. Вугілля, руда, зернові культури, цемент, фосфати та інші сипучі матеріали завжди становили основу промислового і сільськогосподарського виробництва. Ще у XIX столітті морські держави шукали способи організації масових перевезень таких вантажів без застосування тари, оскільки саме тара створювала значні економічні та технологічні труднощі. У XX столітті розвиток індустріалізації, зростання попиту на сталь та енергоносії, а також формування глобальних торговельних шляхів призвели до того, що балкер став невід'ємним елементом світового флоту.

Сьогодні балкери обслуговують усі основні ринки масових перевезень. Вони є головним транспортним засобом для експорту залізної руди з Бразилії та Австралії, вугілля з Індонезії та Південної Африки, зернових культур з України, США та Аргентини. Тобто саме ці судна формують основу продовольчої та енергетичної безпеки світу. Наприклад, Китай, який є провідним споживачем руди та вугілля, залежить від регулярного функціонування балкерних перевезень більше, ніж від будь-якого іншого сегмента торговельного флоту.

Розвиток балкерного флоту зумовив і модернізацію портової інфраструктури. Кожне нове покоління більших за розмірами суден вимагало поглиблення акваторій, розширення причалів, будівництва нових терміналів. Для завантаження та розвантаження великих партій сипучих вантажів створювалися спеціалізовані комплекси, обладнані високопродуктивними конвеєрними системами, грейферами та перевантажувачами.

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.01	Арк.
						9
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

Балкерний флот є найбільш чутливим до коливань світової економіки. У науковій та практичній літературі для оцінки динаміки цього ринку часто використовується Baltic Dry Index (BDI) — інтегральний показник, що відображає середні фрахтові ставки на перевезення основних видів масових вантажів. Коливання цього індексу віддзеркалюють реальний стан світової економіки: коли промисловість переживає підйом, попит на перевезення зростає, і ставки піднімаються; у періоди рецесії навпаки — фрахт знижується, що свідчить про скорочення виробництва.

Не менш важливим є соціально-економічний аспект. Балкерні перевезення забезпечують робочі місця для сотень тисяч моряків, портових працівників, інженерів та суднобудівників. Вони створюють додану вартість для цілих регіонів, формуючи залежність локальних економік від стану світового ринку сировини. Для країн, що експортують масові вантажі, наявність ефективного балкерного флоту або доступу до нього стає питанням стратегічного розвитку. У свою чергу, для держав-імпортерів безперервність балкерних перевезень є питанням національної безпеки.

Балкер — це також віддзеркалення географічних особливостей світової торгівлі. Найбільш інтенсивні маршрути цього сегмента проходять між країнами Південної Америки, Африки, Австралії та Азії. Саме там знаходяться найбільші родовища руди, вугілля і зернових. Водночас європейські країни, будучи переважно споживачами, виступають важливим ринком, що визначає обсяги перевезень. Таким чином, географія балкерних маршрутів дозволяє простежити логіку глобального розподілу ресурсів та напрямки світових потоків.

Усе це дає підстави стверджувати, що балкер є не просто транспортним засобом. Це системоутворюючий елемент глобальної економіки, від функціонування якого залежить промисловість, енергетика та продовольча безпека світу.

З огляду на вищесказане, дослідження балкерного флоту у сучасному судноплаванні має надзвичайну актуальність. Воно дозволяє зрозуміти не лише технічні особливості цих суден, але й ширший контекст їхнього впливу на економіку, міжнародні відносини та екологічну ситуацію. Саме тому аналіз ролі

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.01	Арк.
						10
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

балкерів у сучасному світі повинен займати важливе місце у наукових працях з суднобудування та морської логістики.

1.2 Класифікація сучасних балкерів.

Балкери становлять надзвичайно різномірну групу суден, яка постійно удосконалюється залежно від потреб світової економіки. Сучасні балкери можна класифікувати за різними критеріями. Класифікація за типом вантажу відображає галузеву спеціалізацію світової економіки, за розмірами — визначає можливості судна у конкретних портах і каналах, за районами плавання — показує рівень технічної підготовки до складних умов експлуатації, а за конструкцією — демонструє інженерні підходи до забезпечення безпеки та універсальності. Усе це свідчить про те, що сучасний балкер — це складна транспортна система, яка поєднує в собі універсальність і спеціалізацію, економічність і високі вимоги до безпеки, глобальність і регіональну прив'язаність. Розглянемо основні види класифікації для сучасних балкерів.

1.2.1 Класифікація за типом вантажу.

Найпоширенішим критерієм є поділ балкерів за характером вантажу, для якого вони призначені.

- **Універсальні балкери** — найчисельніший сегмент, розрахований на перевезення руди, вугілля, зернових, фосфатів та інших масових сипучих вантажів. Їхня конструкція є компромісом між різними вимогами, що забезпечує високу гнучкість експлуатації.

- **Рудовози** — спеціалізовані балкери з посиленням корпусом і великими вантажними відсіками, призначені для перевезення важкої залізної руди. Вони відзначаються високим відносним дедвейтом і розвиненою системою баластування.

- **Зерновози** — судна, обладнані системами вентиляції та зволоження, що запобігають псуванню зернових вантажів під час транспортування.

- **Цементовози та судна для перевезення мінеральних добрив** — часто мають пневматичні системи завантаження і вивантаження, що дозволяє працювати з пилоподібними матеріалами.

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.01	Арк.
						11
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

- **Лісовози та комбіновані судна** — хоча офіційно відносяться до балкерів, але мають посилені люкові кришки і палуби для перевезення лісу, металопрокату чи проектних вантажів.

Таким чином, класифікація за вантажем відображає прагнення до спеціалізації, що робить експлуатацію більш ефективною і безпечною. [21].

1.2.2 Класифікація за розмірами.

Важливим критерієм є розмірна шкала балкерів, яка безпосередньо визначає райони їхньої експлуатації. Вона базується на співвідношенні розмірів судна і параметрів каналів, проток та портів.

- **Handysize** (до 40 тис. DWT) — малі універсальні балкери, здатні заходити у невеликі порти, часто обладнані власними вантажними кранами.

- **Handymax/Supramax** (40–65 тис. DWT) — середні балкери, найбільш універсальний і поширений сегмент, що обслуговує переважно регіональні маршрути.

- **Panamax** (65–80 тис. DWT) — судна, розміри яких відповідають обмеженням старого Панамського каналу.

- **Kamsarmax** (80–85 тис. DWT) — модифікація Panamax, розроблена під параметри гвінейського порту Камсар, важливого для експорту бокситів.

- **Post-Panamax та Newcastlemax** (85–210 тис. DWT) — більші балкери, призначені для спеціальних глибоководних портів.

- **Capesize** (понад 150 тис. DWT, класично 170–180 тис. і вище) — гігантські балкери, які не можуть проходити через Панамський чи Суецький канали і змушені огинати мис Доброї Надії або мис Горн.

- **Very Large Ore Carriers (VLOC) та Ultra Large Ore Carriers (ULOC)** (понад 300 тис. DWT) — спеціалізовані рудовози, що використовуються на маршрутах Бразилія — Китай.

Ця класифікація наочно демонструє, що розміри балкера визначають не лише його місткість, але й географію плавання та характер експлуатації [21].

1.2.3 Класифікація балкерів за портовими та географічними обмеженнями.

У міжнародному судноплаванні розмірні класи балкерів часто називають від географічних пунктів або портів, що наклали обмеження на довжину, ширину або осадку судна. Це дозволяє стандартизувати флот під потреби ключових ринків.

- **Scawamax** — балкери, розміри яких обмежені портами Скагенської протоки (Skagerrak–Kattegat) та акваторією Північної Європи. Вони спеціально проектується з урахуванням осадки і ширини для проходження у вузьких північних фарватерах.

- **Kamsarmax** — балкери до ~82 тис. DWT, обмежені параметрами порту Камсар у Гвінеї, який є головним центром експорту бокситів. Довжина такого судна зазвичай не перевищує 229 м.

- **Setouchmax** — клас суден, оптимізованих для плавання у Внутрішньому Японському морі (Seto Inland Sea). Вони мають специфічні габарити, щоб проходити під мостами та вузькими протоками японських архіпелагів.

- **Dunkirkmax** — судна, що відповідають розмірам порту Дюнкерк (Франція). В основному це великі балкери, які використовуються для транспортування руди та вугілля у Північну Європу.

- **Newcastlemax** — балкери приблизно до 210 тис. DWT, розміри яких оптимізовані для порту Ньюкасл в Австралії, одного з найбільших у світі центрів експорту вугілля. Максимальна довжина близько 300м, ширина - 50 м, осадка - до 18,4 м.

- **Malaccamax** — гігантські судна (балкери або танкери), чиї розміри відповідають максимальним можливим для проходження Малаккської протоки. Зазвичай це судна дедвейтом близько 300–320 тис. тонн.

Ця система відрізняється від стандартного поділу на **Handysize, Panamax, Capesize**, оскільки вона більш конкретна й прив'язана до інфраструктурних особливостей. Якщо «Panamax» чи «Suezmax» відображають можливість проходження

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.01	Арк.
						13
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

через канали, то класи **Kamsarmax** чи **Newcastlemax** показують здатність судна обслуговувати конкретні порти та вантажопотоки.

Таким чином, ця класифікація має безпосереднє практичне значення: судновласники та фрахтувальники будують і замовляють судна, виходячи з того, які порти вони повинні відвідувати. Наприклад, Китай як головний споживач бокситів і вугілля потребує стабільних поставок з Гвінеї та Австралії, тому на ринку зростає попит саме на Kamsarmax і Newcastlemax. [21]

1.3 Конструкція сучасних балкерів.

Конструктивні особливості балкерів відіграють вирішальну роль у експлуатаційній ефективності, безпеці та довговічності. На відміну від класифікації за розмірами чи районами плавання, поділ за конструкцією більш тісно пов'язаний із суднобудівними традиціями та технічними нормами, які регламентуються класифікаційними товариствами. Саме конструкція корпусу, компоновка вантажних трюмів, наявність подвійних бортів та днищ, тип кришок люків і допоміжних систем визначають функціональність судна та його здатність обробляти певні типи вантажів.

Абсолютна більшість сучасних балкерів належить до **однопалубних суден**. Це пояснюється необхідністю створення великих, вільних від внутрішніх перебі-рок вантажних трюмів, що полегшує завантаження сипучих матеріалів. Вантажні люки займають майже всю ширину корпусу, що забезпечує швидке завантаження та розвантаження. [4]

Багатопалубні балкери сьогодні трапляються рідко й переважно належать до комбінованих або спеціалізованих типів, коли виникає потреба у перевезенні кількох видів вантажів одночасно. [4]

Одним із ключових напрямів удосконалення конструкції стало впровад-ження **подвійного дна та подвійних бортів**. Згідно з міжнародними вимогами (зокрема правил Міжнародної морської організації та IACS), сучасні балкери проєктуються виключно як **двостінні**, де простір між бортами та дном використовується під баластні танки.

Подвійні борти мають низку переваг:

- підвищують загальну міцність корпусу;

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.01	Арк.
						14
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

- забезпечують додатковий бар'єр при пробоїнах;
- дозволяють гнучкіше управляти остійністю через систему баластних танків;
- полегшують огляд та ремонт у процесі експлуатації.

Внутрішнє компонування балкерів значною мірою визначається формою вантажних трюмів. Вони можуть мати вертикальні стінки, або ж спеціальні похилі шпигати (hopper tanks), які зводять нанівець накопичення залишків вантажу й полегшують повне очищення після рейсу. [4]

У великих балкерів вантажні відсіки відокремлюються потужними поперечними перебірками з люковими отворами, що дозволяє витримувати високий тиск сипучого вантажу.

Кришки люків — важливий елемент конструкції, адже вони забезпечують герметичність вантажних трюмів і захист вантажу від морської води. Залежно від розмірів і особливостей судна застосовуються різні типи:

- **роликові** (відкатні) кришки;
- **поворотні**;
- **секційні, що зсуваються одна під одну**;
- у менших балкерів — **знімні панелі**.

Для великих океанських балкерів характерні масивні сталеві кришки з гідравліч-ним приводом, що дозволяють швидко відкривати та закривати вантажні трюми. [2]

Окремо можна виділити цікаві конструктивні рішення, наприклад:

- **ОВО-судна (ore-bulk-oil carriers)** — універсальні кораблі, здатні перевозити як сухі сипучі, так і рідкі вантажі. Ідея таких суден виникла в середині ХХ століття, коли судновласники прагнули мінімізувати порожні рейси. Наприклад, після доставки руди з Бразилії в Європу судно могло б завантажити нафту в Перській затоці й повернутися з повним завантаженням. Проте через складність конструкції, високі витрати на обслуговування і ризики забруднення вони сьогодні майже не використовуються.

- **Саморозвантажувальні балкери (self-unloading bulk carriers).** Їх конструкція включає конвеєрні системи і стрічкові транспортери, які дозволяють

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.01	Арк.
						15
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

судну розвантажуватися без портових кранів. Такі судна широко застосовуються у Великих озерах США та Канади, а також у портах із недостатньою інфраструктурою.

Всі ці конструктивні особливості безпосередньо впливають на економічність експлуатації. Наприклад, наявність похилих шпигатів знижує час простою на очищення трюмів і дає можливість швидше переходити з одного типу вантажу на інший. Подвійний борт підвищує безпеку і довговічність судна, що важливо для страхових компаній і класифікаційних товариств. А саморозвантажувальні системи зменшують залежність від портової інфраструктури, підвищуючи конкурентоспроможність судна на ринку фрахту. [4]

1.4 Ринок вантажоперевезень балкерним флотом.

1.4.1 Загальна характеристика ринку.

Станом на 2024 рік обсяг морського сухого балкерного фрахту перевищив 5,6 мільярда метричних тонн. Це рекордне значення, яке відображає стабільне відновлення попиту після кризових періодів, зумовлених глобальною пандемією та порушенням логістичних ланцюгів. Зростання відбулося приблизно на 4,2 % у порівнянні з попереднім роком, причому найбільш високі темпи приросту було зафіксовано у четвертому кварталі — близько 5,2 %. Одночасно зріс і світовий флот балкерів: кількість суден, що виконували міжнародні рейси із завантаженням, досягла понад 154 тисяч, тоді як загальна кількість активних суден наблизилася до 17,5 тисяч одиниць. [21]

1.4.2. Динаміка фрахтових ставок і індексів.

Ефективність балкерного ринку багато в чому визначається рівнем фрахтових ставок, які формуються під впливом попиту на сировину, доступності тоннажу та глобальних економічних коливань. Найважливішим орієнтиром є Baltic Dry Index, що відображає вартість транспортування основних видів масових вантажів різними класами суден. У 2025 році індекс демонстрував значну волатильність, проте у липні досяг 2258 пунктів — найвищого рівня з весни 2024 року.

Особливо активну динаміку показав сегмент Capesize, де середньодобові доходи зростали найбільш швидкими темпами завдяки зростанню попиту на перевезення залізної руди з Австралії та Бразилії до Китаю. Панамакс і Супрамакс мали більш стриману динаміку, що пояснюється особливостями їхніх маршрутів та більш жорсткою конкуренцією з іншими видами транспорту. [10]

1.4.3. Географія торгових потоків.

Торгові потоки сухих навалочних вантажів концентруються навколо основних експортерів та імпортерів. Серед провідних експортерів домінують Австралія та Бразилія, які забезпечують значну частку світового ринку залізної руди та вугілля. Важливими постачальниками також є Південно-Африканська Республіка, Канада та країни Західної Африки, що спеціалізуються на бокситах. Основними імпортерами залишаються Китай, Японія, Індія, Південна Корея та держави Європейського Союзу, де попит на сировину формується за рахунок сталеливарної та енергетичної промисловості.

Сучасні балкери здатні забезпечувати транспортування вантажів на відстань у десятки тисяч морських миль, проте ефективність таких перевезень безпосередньо залежить від пропускної здатності портової інфраструктури. Так, порти Бразилії та Австралії активно розширюють глибоководні термінали для приймання суден класу VLOC і Capesize, тоді як європейські та азійські хаби модернізують перевалочні комплекси, аби скоротити час простоїв та забезпечити ефективність ланцюгів постачання. [21, 16]

1.4.4. Пропозиція флоту та тенденції розвитку.

Загальна тоннажна місткість світового торговельного флоту на початок 2024 року сягнула 2,35 мільярдів DWT. Із цієї кількості значна частка припадає саме на балкери, що обслуговують глобальну торгівлю сировиною. Введення в експлуатацію нових суден у 2024 році сприяло збільшенню кількості одиниць dry bulk fleet до понад 5300, проте темпи зростання суттєво нижчі, ніж у попередні десятиліття. Якщо у 2005–2010 роках річний приріст тоннажу складав понад 7 %, то нині цей показник не перевищує 3–4 %.

Водночас дедалі більшого значення набуває екологічна модернізація балкерного флоту. Нові вимоги Міжнародної морської організації щодо зниження

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.01	Арк.
						17
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

викидів оксидів сірки та азоту, а також обмеження на рівень вуглецевих викидів стимулюють судновласників інвестувати у будівництво суден нового покоління. Йдеться як про впровадження більш економічних двигунів і систем очищення вихлопів, так і про альтернативні форми енергопостачання, включно з використанням зрідженого природного газу чи допоміжних вітрових установок. [21, 3]

1.4.5. Виклики та перспективи.

Попри зростання обсягів перевезень, ринок балкерного транспорту стикається з низкою викликів. Нестабільність цін на сировину може швидко знизити попит на перевезення, як це відбувалося у періоди падіння виробництва сталі в Китаї. Геополітична напруга і регіональні конфлікти впливають на безпеку маршрутів та збільшують витрати на страхування. Додатковим обмеженням є інфраструктурні бар'єри: багато портів світу не здатні приймати надвеликі балкери через осадку чи обмеження глибини фарватерів. [6]

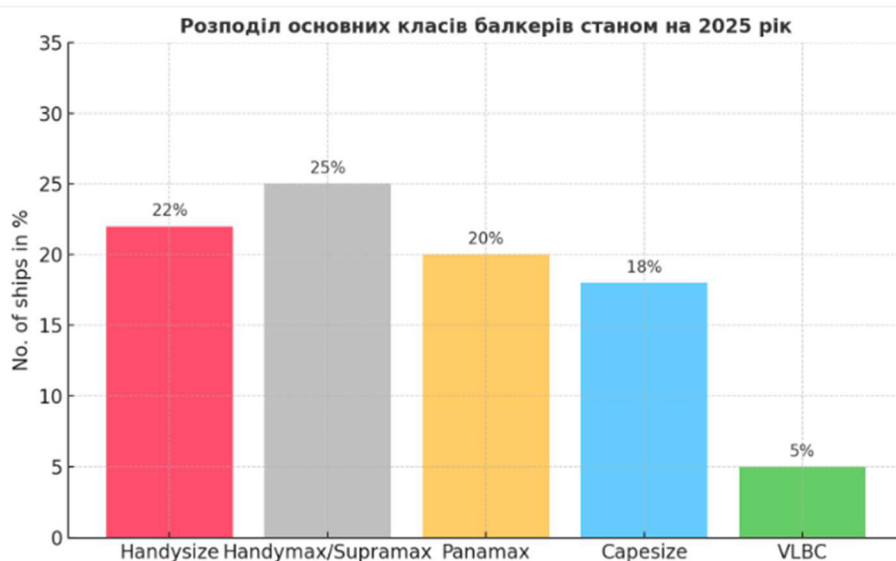


Рис. 1.4.1 Розподіл основних класів балкерів DWt понад 5000 т станом на 2025 рік

1.5 Сучасні тенденції у розвитку балкерного флоту.

Сучасні тенденції у розвитку балкерного флоту визначаються не лише зростанням обсягів перевезень, але й новими викликами. У міру збільшення населення планети та зростання потреб у сировині, обсяги морських перевезень продовжують демонструвати стійке зростання. За оцінками міжнародних

організацій, саме сухі масові вантажі формують близько половини всього світового морського товарообігу. Це зумовлює постійний попит на балкери різних розмірних класів, від «Handysize» до «Capesize». При цьому особливе значення мають універсальні судна, здатні працювати на маршрутах з обмеженими портовими можливостями, що забезпечує гнучкість у глобальних логістичних ланцюгах. [2]

Іншою важливою тенденцією є зростання середнього розміру суден. Сучасний ринок віддає перевагу великим балкерам, які дозволяють мінімізувати транспортні витрати завдяки економії на масштабі. Клас «Capesize» дедалі частіше використовується на протяжних маршрутах, що пов'язують регіони видобутку руди та вугілля з основними промисловими центрами Азії. Водночас середні класи — «Panamax» і «Supramax» — залишаються важливими у світовій системі торгівлі, оскільки забезпечують універсальність перевезень і здатні працювати в умовах портових обмежень. Тенденція до зростання тоннажу сприяє модернізації портової інфраструктури, що, своєю чергою, стимулює розвиток регіональної економіки. [2]

Сучасні виклики у сфері екології, зокрема прагнення до зниження викидів парникових газів, визначають курс на модернізацію флоту. Власники суден змушені інвестувати у встановлення систем очищення вихлопних газів (scrubbers), впровадження енергоощадних конструктивних рішень, а також розглядати альтернативні види палива. Серед перспективних напрямів розвитку варто відзначити використання зрідженого природного газу (LNG) як основного палива, випробування суден на аміаку та метанолі, а також інтеграцію допоміжних вітрових і сонячних систем. [2]

Не менш суттєвою є цифровізація управління балкерним флотом. Сучасні технології дають змогу оптимізувати маршрути, скорочувати витрати пального, відстежувати технічний стан суден у режимі реального часу. Використання великих даних, штучного інтелекту та автоматизованих систем управління забезпечує підвищення ефективності роботи та зменшення ризиків. Дедалі більше компаній інвестують у створення «цифрових двійників» суден, що

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.01	Арк.
						19
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

дозволяє прогнозувати їхню поведінку у різних умовах експлуатації та своєчасно виявляти можливі несправності.

Важливим фактором є і структурні зміни на ринку балкерних перевезень. Зокрема, спостерігається укрупнення судноплавних компаній та формування великих операторів, здатних контролювати значні обсяги вантажопотоків. Це дозволяє ефективніше використовувати флот і формувати гнучкі логістичні рішення для клієнтів. Водночас конкуренція на цьому ринку залишається високою, що стимулює постійний пошук інновацій та оптимізацію бізнес-моделей. [2]

Підсумовуючи, можна зазначити, що сучасний балкерний флот перебуває у стані динамічної трансформації, яка визначається комплексом економічних, технологічних, екологічних та геополітичних чинників. Головними напрямками розвитку залишаються збільшення тоннажу, підвищення ефективності перевезень, впровадження екологічних та цифрових технологій, а також адаптація до змін у глобальній системі торгівлі. Балкери зберігають своє стратегічне значення для світової економіки, а їх модернізація стає важливим елементом забезпечення сталого розвитку міжнародних транспортних систем у XXI столітті.

1.6 Впровадження «зелених» технологій у сучасний балкерний флот.

Впровадження «зелених» технологій у секторі балкерних перевезень стало одним із ключових чинників його розвитку, оскільки саме ці судна здійснюють значну частину світового тоннажопотоку та, відповідно, мають вагомий вплив на загальний рівень викидів у галузі.

Найбільший поштовх до екологізації флоту надали регуляторні ініціативи Міжнародної морської організації (ІМО). Введення глобальних норм щодо обмеження вмісту сірки у судовому паливі до 0,5% з 2020 року примусив значну частину судновласників інвестувати у встановлення скрубєрів або переходити на більш чисті види палива. Більшість компаній була змушена обирати між застосуванням систем очищення відпрацьованих газів та використанням низькосірчастого палива, що значно дорожче за традиційний мазут. [25]

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.01	Арк.
						20
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

Наступним важливим етапом стало впровадження нових стандартів енергоефективності. Зокрема, мова йде про індекс енергоефективності існуючих суден (ЕЕХІ) та індикатор вуглецевої інтенсивності (СІІ), що почали застосовуватись із 2023 року. Для балкерів це означало необхідність технічних і конструктивних модернізацій, спрямованих на зниження споживання пального. Серед основних заходів слід відзначити модернізацію гвинто-рульових комплексів, впровадження енергозберігаючих пристроїв, оптимізацію форми корпусу та використання спеціальних покриттів, що знижують опір руху. Масовість цих рішень підтверджується статистикою: за даними BIMCO, у 2024 році понад 65% балкерів, що перебували в експлуатації, вже пройшли або проходили технічні роботи з модернізації для відповідності вимогам ЕЕХІ. [12]

Окремий напрямок екологізації стосується використання альтернативних видів палива. Серед балкерного флоту дедалі активніше впроваджується зріджений природний газ (LNG) як основне паливо. Хоча первісно LNG-інфраструктура розвивалася переважно для контейнерних суден і танкерів, останніми роками почав зростати попит на будівництво великих балкерів із можливістю роботи на зрідженому газі. На початок 2025 року у світі експлуатувалося близько 150 балкерів, що використовують LNG, і ще понад 200 перебували на різних стадіях будівництва. Водночас активно ведуться дослідження щодо застосування метанолу та аміаку як перспективних видів палива, які здатні забезпечити майже нульовий рівень викидів вуглецю при належній організації виробничо-логістичних ланцюгів. [25]

Додатково варто відзначити розвиток гібридних рішень, що поєднують традиційні двигуни внутрішнього згоряння з допоміжними відновлюваними джерелами енергії. Все більше балкерів отримують системи вітрової підтримки у вигляді роторних вітрил Норсепайпер або твердої вітрилоподібної надбудови. Такі пристрої дозволяють зменшити витрати пального на 5–15% залежно від умов плавання, а у деяких випадках — і до 20%. Експерименти з відновлюваними технологіями відбуваються не лише на новобудовах, а й на судах, що перебувають в експлуатації, оскільки додавання вітрових систем порівняно недороге у співвідношенні з потенційною економією.

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.01	Арк.
						21
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

Подібні інновації поступово перестають бути поодинокими і набувають системного характеру, особливо в компаніях, що працюють на європейському чи азійському ринку, де вимоги до скорочення викидів жорсткіші. [29]

Ще одним напрямом екологізації стає цифровізація та впровадження систем моніторингу викидів у реальному часі. Балкерні компанії все частіше встановлюють датчики контролю пального та системи відстеження викидів CO₂, що дозволяє не лише відповідати новим нормативам, а й оптимізувати експлуатацію. Цифрові рішення дають можливість підбирати оптимальну швидкість руху («slow steaming»), що знижує витрати пального без втрати ефективності перевезень. Така практика вже стала масовою, і на кінець 2024 року більшість великих операторів балкерного флоту впровадили системи автоматизованого моніторингу. [25]

Таким чином, впровадження «зелених» технологій у балкерному флоті сьогодні має масовий характер і охоплює як технічні, так і організаційні аспекти діяльності судноплавних компаній. У найближчі роки очікується подальше зростання кількості суден на альтернативних видах палива, широке застосування гібридних вітрових систем і повсюдне використання цифрових платформ для управління енергоефективністю. З огляду на масштабність цього процесу, можна стверджувати, що балкерний флот стає однією з найдинамічніших складових глобальної стратегії «зеленого переходу» у морських перевезеннях.

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.01	Арк.
						22
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.02			
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата				
					Аналіз методів вибору основних елементів балкера	Літ	Аркуш	Аркушів
Студент	Джула Д. В.					у	23	5
Консульт.	Пащенко Ю.М.					НУК імені адм. Макарова		
Керівник	Пащенко Ю.М.							
Зав. каф.	Некрасов В.О.							

2. Аналіз методів вибору основних елементів балкера.

Проектування сучасного балкерного судна є складним багатопараметричним завданням, у якому необхідно враховувати широкий спектр факторів — від вантажомісткості й мореходних якостей до обмежень, пов'язаних із портовою інфраструктурою, економічною доцільністю та екологічними вимогами. Основні елементи балкера, зокрема довжина, ширина, осадка, висота борту, співвідношення розмірів корпусу, обираються на стадії початкового проектування, і саме від цього етапу залежить ефективність експлуатації судна упродовж усього життєвого циклу. Для обґрунтування параметрів корпусу та технічних характеристик у сучасному суднобудуванні застосовуються різні методи оптимізації, серед яких метод варіацій, градієнтні методи, методи випадкового пошуку — як глобального, так і локального характеру, а також метод порівняння.

Метод варіацій належить до класичних підходів у розрахунках. Його суть полягає у варіюванні початкових параметрів проєкту (наприклад, довжини по конструктивній ватерлінії, відношення ширини до довжини, коефіцієнта повноти корпусу) у заданих межах із подальшим визначенням впливу цих змін на ключові критерії якості: вантажомісткість, остійність, опір руху, вартість будівництва та експлуатації. Фактично, інженер здійснює серію розрахунків на основі різних комбінацій параметрів і вибирає ті, що забезпечують найкращий баланс між технічною та економічною ефективністю. Перевагою методу є його наочність та відносна простота, проте він потребує значних обсягів обчислень і часто не гарантує отримання глобального оптимуму, обмежуючись локальними рішеннями. У практиці проектування балкерів цей метод найчастіше застосовується на ранніх етапах, коли необхідно оцінити чутливість проєктних характеристик до зміни базових параметрів.

Градієнтні методи належать до категорії чисельних оптимізаційних підходів, які базуються на аналізі похідних цільової функції за параметрами. При проектуванні балкера цільовою функцією може виступати, наприклад, мінімізація собівартості перевезень або мінімізація питомого опору руху. Градієнтний метод дає можливість визначати напрямок найшвидшого зменшення

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.02	Арк.
						24
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

(чи збільшення) цільової функції та, відповідно, покроково наближатися до оптимального рішення. Такий підхід ефективний у задачах із великою кількістю параметрів, коли прямий перебір варіантів надто затратний. Серед переваг — висока швидкість збіжності до результату, серед недоліків — чутливість до початкових умов і можливість «застрягти» у локальному мінімумі. У практичних задачах суднобудування градієнтні методи використовують для уточнення вже знайдених варіантів конструкції та оптимізації у вузьких параметричних областях.

Особливе місце серед сучасних методів займають *методи випадкового пошуку*. Вони не потребують детального знання математичної структури цільової функції, а ґрунтуються на генерації множини випадкових варіантів параметрів із подальшою оцінкою кожного з них.

Глобальний метод випадкового пошуку передбачає створення великої кількості випадкових комбінацій основних елементів балкера у широких межах допустимих значень. Кожний варіант оцінюється за критеріями економічної ефективності та технічної відповідності, після чого обираються найкращі рішення. Сильна сторона глобального пошуку — можливість знаходити оптимум навіть у складних багатовимірних задачах із численними локальними мінімумами, оскільки випадкова генерація охоплює різні області простору параметрів. Недоліком є значні обчислювальні витрати: для досягнення надійного результату потрібна велика кількість ітерацій. У сфері проектування балкерів глобальний випадковий пошук використовується при створенні нових концептуальних моделей, коли бракує досвіду або аналітичних залежностей для точного прогнозування результатів.

На противагу йому, *локальний випадковий пошук* зосереджується на дослідженні вузької області параметрів навколо вже відомого або попередньо обраного рішення. Тобто випадкові варіанти генеруються не в усьому діапазоні, а лише поблизу певної точки, яка вважається базовою. Це дозволяє уточнити знайдені параметри та досягти більшої точності у визначенні оптимальних характеристик. Локальний випадковий пошук потребує менших обчислювальних ресурсів, однак може призвести до пропуску глобального оптимуму, якщо

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.02	Арк.
						25
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

вихідна точка була вибрана невдало. У суднобудівній практиці цей метод доцільно використовувати для деталізації параметрів після застосування глобального пошуку або варіаційного аналізу.

Ще одним важливим підходом є **метод порівняння**, який ґрунтується на використанні статистичних і аналітичних даних щодо вже побудованих або експлуатованих балкерів аналогічного класу. У цьому випадку проєктувальники спираються на досвід, накопичений у суднобудівній галузі, і зіставляють заплановані параметри нового судна з перевіреними характеристиками існуючих прототипів. Такий метод дозволяє швидко виявити невідповідності або, навпаки, підтвердити доцільність обраних рішень. Перевагою є надійність і практична перевіреність результатів, а недоліком — обмеженість у новаторських проєктах, коли аналогів не існує. У сучасній практиці метод порівняння застосовують як базовий інструмент на етапі попереднього проєктування: наприклад, при визначенні основних розмірів Panamax чи Supramax балкерів розробники орієнтуються на середньостатистичні параметри вже працюючого флоту, адаптуючи їх до конкретних умов експлуатації.

У сучасному проєктуванні балкерів спостерігається тенденція до комбінування зазначених методів. Наприклад, спершу застосовується глобальний випадковий пошук для формування множини можливих варіантів, далі використовується метод варіацій для порівняння ключових конструктивних співвідношень, після чого за допомогою градієнтних методів уточнюються остаточне рішення. Паралельно результати перевіряються методом порівняння з характеристиками суден-аналогів, що дозволяє забезпечити практичну надійність розрахунків.

Підсумовуючи, можна зазначити, що метод варіацій, градієнтні підходи, глобальний і локальний випадковий пошук, а також метод порівняння становлять важливий арсенал інструментів для проєктування балкерного флоту. Їх застосування дозволяє не лише забезпечити відповідність суден технічним і нормативним вимогам, але й досягти високої економічної ефективності експлуатації. У контексті зростаючих вимог до енергоефективності та екологічності балкерів, оптимізаційні методи набувають ще більшого значення,

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.02	Арк.
						26
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

оскільки навіть незначне покращення у співвідношенні основних елементів може дати суттєвий ефект на масштабі світового ринку перевезень. [14]

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.02	Арк.
						27
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.03			
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата				
					Продукт-орієнтоване проектування балкера	Літ	Аркуш	Аркушів
Студент	Джула Д. В.					у	28	9
Консульт.	Пащенко Ю.М.					НУК імені адм. Макарова		
Керівник	Пащенко Ю.М.							
Зав. каф.	Некрасов В.О.							

3. Продукт-орієнтовне проектування балкера.

3.1. Розширена система структурного підрозділу суднобудівних робіт.

Для оцінки вартості судна та прогнозування цін на нові проєктні рішення чи можливі придбання всі його окремі компоненти прийнято класифікувати за групами залежно від їхньої ваги.

У США сьогодні застосовується система, відома як Розширена структура розподілу корабельних робіт (ESWBS). Вона є розвитком попередньої системи SWBS. До середини 1960-х років використовувалася інша методика — Бюро суднових консолідованих показників (BSCI). Загалом система BSCI подібна до SWBS/ESWBS, відмінність полягає лише у способі віднесення окремих складових до категорій.

В інших країнах також застосовуються національні класифікаційні підходи. Наприклад, у Великобританії діє система, побудована на базі її національних стандартів проєктування (NES). Як і BSCI, вона за своєю структурою близька до SWBS/ESWBS, однак має певні відмінності у групуванні окремих вагових статей.

Узагальнено можна сказати, що всі три системи поділяють вагу судна на схожі категорії, які наведено в таблиці 1.5. Сума груп 100–700 визначає малу вагу судна, а з урахуванням категорій F і M отримують повне водотоннажне навантаження наприкінці життєвого циклу. [15]

У системі SWBS група 800 використовується для обліку витрат на технічне забезпечення будівництва судна, група 900 — для витрат, пов'язаних із конкретними операціями верфі. Додатково виділяється група 1000, яка охоплює страхові платежі та інші банківські операції, що супроводжують процес суднобудування. [15]

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.03	Арк.
						29
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2. Формування CER для будівництва балкера.

Таблиця 3.2.1 - Складові структурного розбиття судна на частини в системах SWBS/ESWBS и NES [15]

Номер групи	Назва SWBS	Опис групи
Група 100	Конструкції	Включає ваги обшивки, набору, палуб, перебірок, надбудов і фундаментів
Група 200	Пропульсивна установка	Включає ваги дизелів, редукторів, валопроводов і рушіїв
Група 300	Електрична установка	Включає ваги обладнання для вироблення електроенергії, силових кабелів, освітлювальних систем і аварійних систем електропостачання
Група 400	Управління та моніторинг	Включає ваги навігаційної системи, системи внутрішнього зв'язку, протипожежної системи, системи спостереження, радіолокаторів, гідролокатором, радіоприймачів та інших систем управління і контролю
Група 500	Допоміжні системи	Включає ваги систем кондиціонування, вентиляції, охолодження і пожежогасіння, дистилаторів, вантажних трубопроводів і систем рульового управління
Група 600	Устаткування і фурнітура	Включає ваги дельних речей, ізоляції, фарбування, обладнання та фурнітури житлових приміщень, санітарних приміщень, офісів, медичних приміщень, сходів, комор, пралень і майстерень
Група 700	Озброєння	Включає ваги зброї, боєприпасів, систем зберігання та обробки боєприпасів.
Група F*	Вантаж	Включає ваги всіх змінних вантажів: команди з багажем, води, харчів, палива, мастил і т. д.
Група M	Запаси	Включає ваги доданих систем, змін та інших доповнень
Група 800	Інтеграція / Інжиніринг	Невагова категорія. Включає такі елементи, як креслення корабля, 3D-моделі, забезпечення якості, сертифікаційні стандарти, обладнання для навчання та навчання.
Група 900	Збірка і сервіси підтримки	Невагова категорія. Включає все, що необхідно для побудови корабля, його спуску і випробувань. Сюди входять будівельні ліси, страхування, елементи спуску корабля, здавальних випробувань і ін.

У процесі переходу від нижчих до вищих етапів проєктування стає доступною детальніша інформація про трудові витрати для всіх груп SWBS, яка необхідна для визначення строків будівництва судна. Уже на етапі попереднього проєктування ці дані використовуються як основа для формування календарного плану. Оскільки загальний час, що витрачається на проєктування, підготовку виробництва та саме будівництво корабля, визначається регресійними залежностями від зазначених трудових норм, строки спорудження головного

судна розраховуються відносно просто — через поділ загального обсягу робіт за видами на кількість задіяних працівників.

При проведенні статистичного аналізу вартісні показники корелюються з цими характеристиками та параметрами розподілу. На їх основі будуються рівняння регресії, тобто емпіричні співвідношення ECER (Estimated Cost and Engineering Relationships), які дають змогу прогнозувати витрати на будівництво та експлуатацію нового судна, використовуючи накопичений досвід створення та експлуатації подібних кораблів. [15]

Сьогодні параметричний метод широко застосовується суднобудівними підприємствами для визначення ECER на основі даних SWBS, особливо на етапах попереднього та контрактного проєктування. Таблиця 3.2.2 демонструє приклад такої параметричної обробки для будівництва балкера водотоннажністю 5000–10 000 тонн. [15]

Дослідження закономірностей проєктно-орієнтованого підходу показують, що найбільш оптимальним моментом для прогнозування вартості та строків спорудження судна є саме етап попереднього проєктування. У цей період формується загальна конфігурація майбутнього корабля, визначається його структура згідно з ESWBS, а також застосовуються відповідні емпіричні співвідношення ECER для оцінки витрат. На цьому рівні розрахунки можна обмежити формуванням ECER трудових витрат і витрат на матеріали (приклад наведено в таблиці 3.2.2). Водночас важливо враховувати додаткові чинники, зокрема рівень оплати праці, податкові відрахування та інші збори. [15]

Таблиця 3.2.2 - Типові регресійні рівняння (ECERs) концептуального проєктування балкера [15]

No	SWBS	Витрати на оплату праці, людино-години	Матеріальні витрати, дол.
1	100	$CF * 177 * Weight_{100} ^{0.862}$	$800 * Weight_{100}$
2	200	$CF * 365 * Weight_{200} ^{0.704}$	$15000 + 20000 * Weight_{200}$
3	300	$682 * Weight_{300} ^{1.025}$	$25000 * Weight_{300}$
4	400	$1605 * Weight_{400} ^{0.795}$	$40000 * Weight_{400}$
5	500	$CF * 34.8 * Weight_{500} ^{1.24}$	$10000 + 10000 * Weight_{500}$
6	600	$310 * Weight_{600} ^{0.949}$	$5000 + 10000 * Weight_{600}$

Під час розподілу загального обсягу робіт на окремі види та організації їх виконання за допомогою мережевих графіків суднобудівні верфі зазвичай спираються на власний досвід будівництва кораблів. На основі цього досвіду вони формують власні регресійні залежності, які використовуються для визначення структури робіт і потреби в робочій силі на стадії складання попередніх проєктів. Водночас існує можливість застосування стандартизованих мережевих графіків суднобудування та відповідних рівнянь, що описують динаміку використання трудових ресурсів.

У практиці суднобудування застосовується так званий коефіцієнт типу TF, значення якого залежить від конкретного типу судна, а також коефіцієнт продуктивності PF, що відображає ефективність роботи конкретного суднобудівного підприємства. Визначення цих параметрів виконується на основі спеціалізованих довідкових таблиць (табл. 3.2.3 та 3.2.4), які враховують характер судна й виробничі можливості верфі.

Таблиця 3.2.3 - Значення коефіцієнта TF для різних типів суден [15]

No	Тип судна	Значення TF коефіцієнту
1	Танкер для сирої нафти	0.80
2	Цистерна для перевезення нафтопродуктів	1.13
3	Хімічний танкер	1.25
4	Танкер з подвійним корпусом	0.90
5	Наповнювач	0.85
6	Універсальне вантажне судно	0.95
7	Контейнеровоз	0.96
8	Корабель ро-ро	0.83
9	Корабель для перевезення автомобілів	0.61
10	Пором	1.25
11	Пасажирське судно	3.00
12	Риболовецьке судно	2.20
13	Буксир	0.80
14	Бойовик - крейсер (ядерний)	9.00
15	Бойовик - руйнівник	8.00
16	Бойовик - Фрегат	7.00
17	Десантний корабель - LHA / LHD	7.00
18	Десантний корабель - LSD / LPD	5.00
19	Допоміжний корабель - Танкер	2.50
20	Допоміжне судно - тендер	4.50
21	Дослідницьке судно	1,25

22	Морський буксир	1,00
23	Криголам берегової оборони	4,50

Таблиця 3.2.4 - Значення коефіцієнтів продуктивності верфі [15]

No	Країна виробник / Тип судна	Значення факторів продуктивності			
		Сталь	Обладнання	Матеріали	Загальні
	США				
1	Бойові кораблі (дуже великі)	5.00	-	-	-
2	Бойові кораблі (великі)	2.50	-	1.21	1.56
3	Подвійне використання	1.70	1.24	1.14	-
4	Сучасна комерційна компанія США (велика)	0.90	0.90	1.00	0.90
5	Сучасна комерційна реклама в США (середня)	1.00	1.00	1.00	1.00
6	Середній показник у США	1.20	1.20	1.00	1.20
	Інші країни				
1	Північна Європа (велика)	0.76	-	0.85	0.331
2	Південна Корея (велика)	0.71	-	0.72	0.283
3	Японія (2002)	-	-	-	0.198
4	Китай (2002)	-	-	-	0.992
	Модульне суднобудування				
1	Модуль конкурентного аутсорсингу США	1.00	0.80	-	-
2	Конкурентний модуль світового класу	0.76	0.52	-	-

3.3. Визначення вартості робіт з проектування і побудови балкера.

Конкретна верф, обрана для будівництва судна, розташована у певній країні, де законодавчі умови визначають рівень заробітної плати, систему оподаткування та норму прибутку. У моделі розрахунку витрат необхідно враховувати ці чинники, особливо рівень заробітної плати, який істотно впливає на кінцеву вартість судна. Алгоритм визначення собівартості та термінів спорудження судна ґрунтується на використанні початкових даних про оплату праці, а також інших стандартів, що залежать від правових і економічних умов у країні розташування суднобудівного підприємства та рівня розвитку його виробничої бази.

Найбільш комплексний підхід до проектування суден із орієнтацією на кінцевий продукт був запропонований асоціацією SPAR. Завершений алгоритм цього методу компанія представила у вигляді спеціальної

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.03	Арк.
						33
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

розрахункової таблиці, зображеної на рис. 3.3.1. Ця таблиця є інструментом для обчислень, де вихідними параметрами виступають тип судна (коефіцієнт TF), його повне водотоннажне навантаження M_{full} та проєктна швидкість V_s . Усі подальші показники визначаються з урахуванням характеристик конкретного суднобудівного виробництва у певній країні та його технічного стану на момент будівництва. Для цього використовуються коефіцієнти продуктивності верфі та регресійні співвідношення ECER, сформовані на основі структури ESWBS (див. табл. 3.2.3–3.2.4).

На основі зазначеного підходу в межах дипломної роботи було сформовано алгоритм оцінки вартості та тривалості комплексу робіт, що включають проєктування, планування, підготовку виробництва на верфі та безпосереднє створення досліджуваного балкера. Отримані результати розрахунків за допомогою цього алгоритму наведені на рис. 3.3.1.

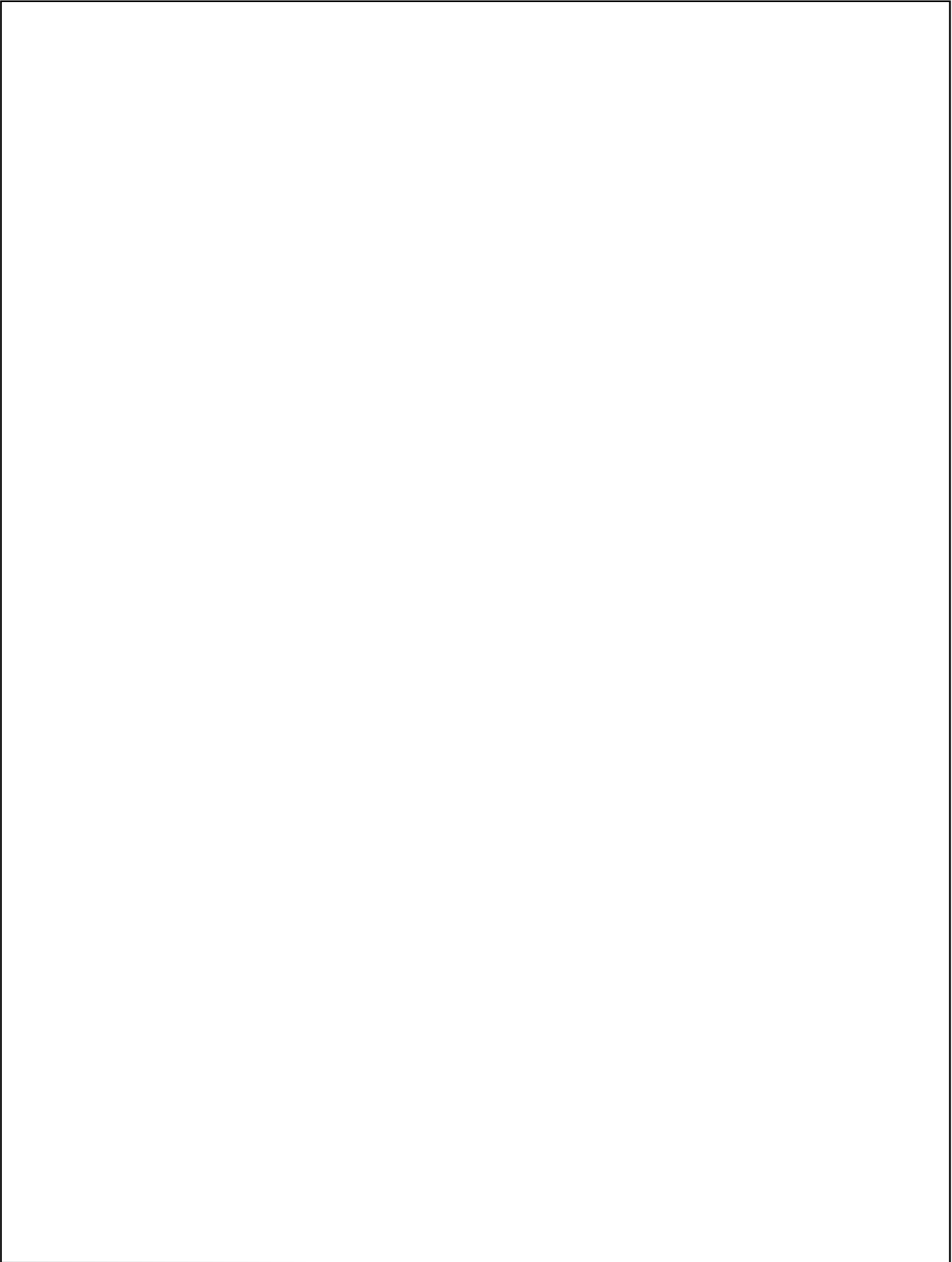
					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.03	Арк.
						34
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 3.3.1 Розрахунок вартості побудови судна

24. MP.135. 6112М.04.ПЗ.03

Таким чином, розроблений у межах дипломної роботи алгоритм дозволив не лише структуровано оцінити етапи проєктування, планування та підготовки виробництва, а й отримати узагальнену вартісну характеристику будівництва досліджуваного балкера. Проведені розрахунки показали, що орієнтовна сума витрат на створення судна становить близько **69 мільйонів доларів США**. Цей результат відповідає середньоринковим значенням для балкерів подібного класу і підтверджує адекватність застосованого підходу. Отже, використання моделі на основі ESWBS та емпіричних співвідношень ECER забезпечує достовірність прогнозів вартості та строків будівництва, що робить її ефективним інструментом для попереднього проєктування й економічного обґрунтування суднобудівних проєктів.

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.03	Арк.
						36
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		



					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.04			
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата				
					Систем-орієнтоване проєктування балкера на інтервалах його ефективного використання	Літ	Аркуш	Аркушів
Студент	Джула Д. В.					у	37	15
Консульт.	Некрасов В.О.					НУК імені адм. Макарова		
Керівник	Пащенко Ю.М.							
Зав. каф.	Некрасов В.О.							

4. Системно-орієнтовне проєктування балкера на інтервалах його ефективного використання.

4.1. Моделі віртуальних просторів експлуатації балкера.

4.1.1. Географічний простір суднових операцій.

Віртуальні простори функціонування судна в межах періодів ефективного використання його життєвого циклу формуються під впливом комплексу чинників, серед яких провідну роль відіграють географічне середовище експлуатації, погодні (навігаційні) умови плавання, а також виробничо-фінансові середовища, що визначають умови створення, технічного обслуговування та комерційної експлуатації судна [23], [19].

З позицій морської логістики та експлуатаційної ефективності судна, ключовим параметром для опису зазначеного простору є географічне положення портів базування і призначення, а також дальність морських переходів між ними [23], [5].

У межах даного дослідження розглядається морський маршрут, що поєднує такі пункти:

- Порт №1 – Баликпапан (Індонезія);
- Порт №2 – Шеньчжень (Китай).

Відстань між цими портами становить близько 1650 морських миль, що дозволяє класифікувати даний маршрут як регіональний міжнародний перехід середньої протяжності, характерний для вантажоперевезень між островними територіями Південно-Східної Азії та прибережними зонами Південного Китаю.

Маршрут проходить у межах Південно-Китайського моря, яке відзначається складною навігаційною та метеорологічною специфікою. Для цього району характерна висока сезонна мінливість напрямів і сили вітру, зумовлена впливом мусонних циркуляцій: у зимовий період переважають північно-східні вітри, у літній — південно-західні. Це створює умови, за яких на більшій частині маршруту вітер діє переважно в борт судна в обох напрямках руху, що є сприятливим фактором для суден, оснащених роторними парусами або іншими вітропоміжними системами [32].

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.04	Арк.
						38
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

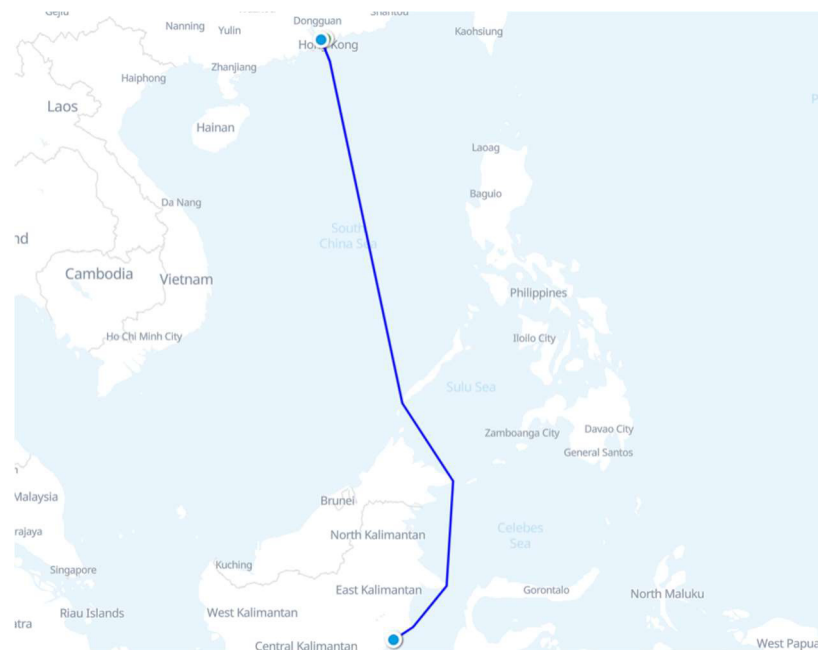


Рис. 4.1.1 Район експлуатації балкера.

4.1.2. Простір погодних умов району експлуатації.

Простір погодних умов маршруту Баликпапан – Шеньчжень формується під впливом комплексних кліматичних і океанографічних факторів, характерних для Південно-Китайського моря та суміжних акваторій. Основними характеристиками цього простору є дії мусонних вітрів, морських течій і хвильових процесів, що безпосередньо впливають на рух судна, його курсостійкість і витрати палива під час перевезення вантажів між портами. Умови експлуатації на даному напрямку відзначаються значною сезонною мінливістю, обумовленою чергуванням північно-східного зимового та південно-західного літнього мусонів [23], [5].

Північно-східний мусон переважає у період з листопада по березень і характеризується стійкими вітрами з напрямку Тихого океану у бік Південно-Китайського моря, що зумовлює формування хвиль середньої висоти від 1,5 до 3 метрів. У цей період рух суден у напрямку Баликпапан – Шеньчжень супроводжується переважно боковими або попутно-боковими вітрами, які можуть позитивно впливати на ефективність вітропоміжних установок. У зворотному напрямку вплив цих вітрів стає більш помітним з точки зору курсової стабільності та навігаційного контролю.

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.04	Арк.
						39
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

У літній період, з червня по вересень, у регіоні встановлюється південно-західний мусон, який приносить підвищену вологість, часті зливи та збурений стан моря. Висота хвиль у цей час зазвичай коливається в межах 2–4 метрів, проте у прибережних районах Калимантану та В'єтнаму може зменшуватись через часткове екранування островами. Середні швидкості вітру на маршруті змінюються в межах від 4 до 10 м/с, а довгострокові статистичні спостереження підтверджують наявність квазістаціонарних режимів вітрового поля, що дозволяє моделювати вплив погодних умов на експлуатаційні показники судна.

Імовірнісна оцінка впливу погодних факторів у цьому регіоні зазвичай базується на використанні розподілів Вейбулла або Логнормального закону для інтенсивності вітру та висоти хвиль. У зв'язку з географічним розташуванням маршруту Баликпапан – Шеньчжень вплив льодових утворень відсутній, що спрощує аналіз сезонних змін експлуатаційних характеристик судна. Загалом погодний простір цього району відзначається стабільною повторюваністю мусонних процесів і відносною передбачуваністю гідрометеорологічних умов, що дозволяє оптимізувати планування рейсів і підвищити ефективність експлуатації судна протягом року [5], [30].

4.1.3. Простір виробничих відносин робочого процесу.

Віртуальний простір виробничих відносин визначається сукупністю основних функціональних операцій, які виконуються судном та відповідними портовими службами під час його експлуатації. До таких операцій належать транспортні дії, пов'язані з послідовними рейсами, перевезеннями вантажів на вільних експлуатаційних лініях, рухом за встановленим розкладом, а також службовим або технічним використанням судна [23], [19].

Особливістю суден, що працюють у режимі послідовних рейсів, є їх експлуатація на основі довгострокових міжурядових або корпоративних контрактів, які передбачають регулярне виконання перевезень між фіксованими портами. У більшості випадків такі судна здійснюють кругові рейси між двома або кількома визначеними пунктами. Під час прямого переходу між портами судно транспортує вантаж, тоді як на зворотному шляху зазвичай проходить з

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.04	Арк.
						40
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

баластом. Типова схема функціонування судна за подібних умов наведена на рисунку 4.1.2.

Основними параметрами послідовного рейсу як базової транспортної операції судна є відстань між портами S_{bp} , маса вантажу, що перевозиться Q_p , швидкість руху під час прямого переходу v_d , швидкість зворотного переходу v_b , а також загальний час морського рейсу t_{st} , який визначається як сума часу прямого та зворотного переходів: $t_{st} = t_{std} + t_{stb}$, де $t_{std} = S_{bp}/v_d$ — час прямого морського переходу, а $t_{stb} = S_{bp}/v_b$ — тривалість рейсу у зворотному напрямку [5].

Такий підхід дозволяє узагальнити робочі процеси судна в межах типових експлуатаційних циклів, забезпечуючи можливість подальшого аналізу ефективності перевезень і планування виробничих операцій на основі техніко-економічних показників рейсу.

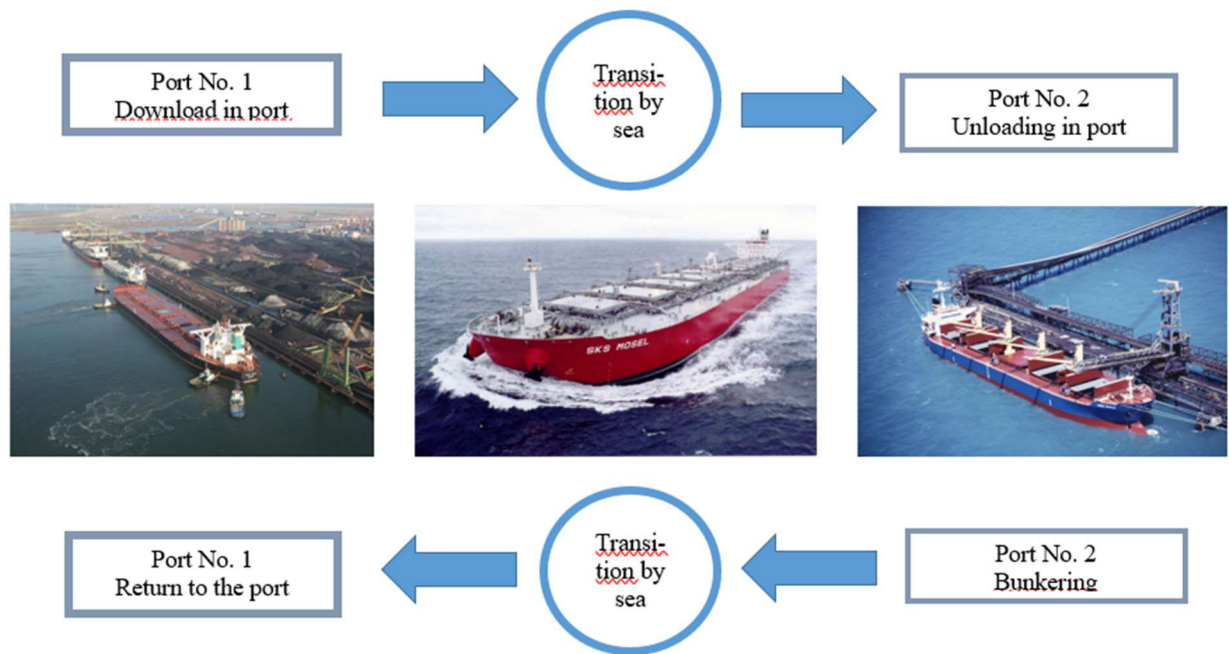


Рис. 4.1.2 - Модель кругового рейсу судна.

Тип портового обладнання, що використовується для навантаження та розвантаження сипучих вантажів із транспортного судна, безпосередньо впливає на продуктивність портових операцій. Від ефективності цього обладнання залежить тривалість стоянки судна в порту та загальна швидкість обігу транспортного засобу. Таким чином, час виконання вантажних робіт визначається співвідношенням $t_{load} = Q_p / q_d$, де Q_p — маса вантажу, що підлягає

обробці, а q_d — продуктивність вантажно-розвантажувального обладнання у портах відправлення та прибуття.

З урахуванням цих факторів, загальний час рейсу судна в обидва напрямки може бути визначений як сума тривалостей морських переходів і стоянок у портах. У спрощеному вигляді вираз для оцінки часу рейсу приймає вигляд: $t_{hrt} = t_{load} + t_{std} + t_{unload}$ — що враховує пропорційний вплив операцій завантаження, вивантаження та переходів між портами, що дозволяє оцінити ефективність експлуатаційного циклу судна та рівень використання його провізної спроможності.

4.1.4. Простір фінансових відносин робочого процесу.

Фінансовий простір робочого процесу судна формується під впливом стану транспортного ринку та особливостей розподілу фінансових потоків між основними учасниками морських перевезень — вантажовідправником, фрахтувальником і судновласником. Саме взаємодія цих суб'єктів визначає економічну ефективність експлуатації судна та стабільність його роботи у складі транспортної системи.

Для комерційного транспортного судна головним показником стану ринку є ймовірність укладання довгострокового фрахтового контракту або договору на перевезення вантажів, що позначається як PF. Наявність такого контракту забезпечує прогнозованість доходів судновласника, зниження ризиків простоїв і підвищення ефективності використання тоннажу.

У випадку укладання фрахтової угоди розподіл грошових надходжень між учасниками транспортного процесу відбувається відповідно до функціональних ролей кожної сторони: вантажовідправник сплачує фрахтову ставку фрахтувальнику, який, у свою чергу, компенсує витрати судновласника на експлуатацію судна та отримує частину прибутку від перевезення. Загальна схема фінансових взаємовідносин між цими учасниками представлена на рисунку 4.3. [23], [19].

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.04	Арк.
						42
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 4.1.3 – Розподіл грошових коштів між учасниками транспортної операції одного кругового рейсу: вантажовідправником (Consignor), фрахтувальником (Charterer) та судновласником (Ship Owner).

Схема, наведена на рисунку 4.1.3, також відображає складові доходів і прибутку, отриманих учасниками транспортної операції, а також витрати, пов'язані з навігаційним забезпеченням, технічним обслуговуванням судна та його амортизацією, що виникають після завершення одного повного кругового рейсу. Аналогічні елементи фінансових операцій формують структуру грошового обороту в межах більш тривалих часових інтервалів, зокрема протягом року експлуатації судна та протягом усього періоду його життєвого циклу.

Для l -го кругового рейсу балкера малюнок 4.3 вводить такі позначення:

$$I_l = fQ_p \quad (4.2)$$

де I_l - дохід фрахтувальника (або дохід судновласника, якщо фрахтувальник і судновласник - одна особа); f - фрахтова ставка; Q_p - кількість вантажу в рейсі судна:

$$fQ_p = E_{var} + P_{charterer} + T_{ch}(t_{tr} / 24) \quad (4.3)$$

Тут E_{var} - змінні витрати по експлуатації судна або поточні рейсові витрати (витрати фрахтувальника);

$P_{charterer}$ - прибуток фрахтувальника до оподаткування з виручки від одного рейсу з перевезення вантажу;

$$E_{var} = E_{fuel\&oil} + \Delta E_{var}; \quad (4.4)$$

$E_{fuel\&oil}$ - витрати на паливо і масло:

$$E_{fuel\&oil} = C_f g_l (q_l t_{load} + q_d t_{std} + q_u t_{unload} + q_b t_{stb}); \quad (4.5)$$

ΔE_{var} - додаткові змінні витрати фрахтувальника, включаючи витрати на навігацію E_{nc} , витрати на завантаження / розвантаження E_{load}, E_{unload} , портові збори E_{pch} і інші витрати, пов'язані з рейсом.

$$T_{ch} (t_{rt} / 24) = I_{iso}; \quad (4.6)$$

- дохід судновласника.

В виразах (4.3) - (4.6):

C_f - ціна палива;

$g_l = (1.02 \dots 1.04)$ - коефіцієнт обліку мастильних матеріалів

q_l, q_d, q_u, q_b - значення годинної витрати палива при русі судна в морі і його стоянці в портах;

t_{rt} - тривалість послідовного рейсу;

$t_{load}, t_{std}, t_{unload}, t_{stb}$ - компоненти t_{rt} (див. (4.5));

T_{ch} - тайм-чартерний еквівалент, який включає витрати судновласника на обслуговування судна, E_{sm} - утримання екіпажу, E_{cm} - непрямі витрати, E_{uc} - страхування судна E_{si} , і прибуток судновласника до оподаткування - P_{sowner} (см. рис. 4.3).

Таким чином, загальні експлуатаційні витрати E_{ll} -го кругового рейсу для розглянутого судна, що працює в режимі послідовних рейсів, можуть бути виражені за допомогою наступної формули:

$$E_l = E_{lfuel\&oil} + \Delta E_{lvar} + E_{lsm} + E_{lcm} + E_{luc} + E_{lsv} \quad (4.7)$$

і основні характеристики ефективності цього l -го кругового рейсу - сумарний дохід I_l і сумарний прибуток P_l учасників транспортної операції - виразами:

$$I_l = I_{lcharterer} + I_{lsowner}; P_l = P_{lcharterer} + P_{lsowner} \quad (4.8)$$

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.04	Арк.
						44
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначення ймовірнісних характеристик вартості палива E_{lfuel} паливо навального судна, спожитого під час l -го кругового плавання в районі його експлуатації, виконується за правилами теорії ймовірностей.

4.2. Модель інженерно-навігаційних властивостей балкера.

Моделі інженерних та навігаційних (морехідних) властивостей судна визначають особливості його функціонування як складної технічної системи. Сукупність цих властивостей характеризується набором параметрів, що залежать від основних геометричних і конструктивних елементів судна — довжини L , ширини B , осадки d , висоти борту D , коефіцієнтів повноти форми корпусу C_B , C_W , C_m , швидкості руху v_s , параметрів головної енергетичної установки, наведених у розділі 1, а також від характеристик систем і обладнання судна [8], [17].

До інженерних характеристик судна належать його місткість та міцність конструкцій. Навігаційні характеристики включають такі морехідні якості, як плавучість, остійність, непотоплюваність, ходовість, керованість і мореплавність.

Властивість місткості визначається необхідними обсягами судових приміщень і площами палуб для розміщення вантажів, механізмів, обладнання, систем і допоміжних конструкцій. Вона вважається забезпеченою, якщо наявні об'єми V_c і площі A_c були не менші $|V_c|$ і $|A_c|$, необхідних для розміщення обладнання і вантажів на судні, вважається достатнім, якщо виконуються наступні нерівності:

$$V_c \geq |V_c|; \quad A_c \geq |A_c| \quad (4.9)$$

Технічна якість судна як міцність передбачає, що напруження σ_c у конструктивних елементах корпусу, які виникають під дією експлуатаційних навантажень, не перевищують допустимих значень $|\sigma_c|$:

$$\sigma_c \leq |\sigma_c| \quad (4.10)$$

Забезпечення плавучості судна потребує виконання умови рівноваги між вагою судна, визначеною сумою мас елементів W_{i00} відповідно до структури розподілу ESWBS, і силою Архімеда, яка дорівнює добутку $\rho g L B d C_B$ в положенні рівноваги судна на тихій воді:

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.04	Арх.
						45
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\sum_{i=1}^7 gW_{i00} + gW_F = \rho g L B d C_B \quad (4.11)$$

Непотоплюваність корабля вимагає виконання нерівності

$$R > |R| \quad (4.12)$$

де R - імовірнісний показник розподілу корпусу судна на відсіки, $|R|$ - необхідне значення цього показника.

Остійність при великих кутах крену повинна відповідати вимогам критеріїв погоди та інших обмежень, що визначають форму та параметри діаграми остійності:

$$K > 1; h_0 > 0.05m; \theta_m > 30\text{deg.}; \theta_v > 60\text{deg.}; \dots \quad (4.13)$$

Ходовість судна забезпечується, коли буксирувальна потужність ЕНР дорівнює добутку потужності енергетичної установки N_E на пропульсивний коефіцієнт η , який враховує ефективність рушійного комплексу на робочих режимах руху:

$$EHP = \eta N_E \quad (4.14)$$

Керованість судна, яка визначається стійкістю на курсі та маневреністю, задається ще на етапі концептуального проектування. Передбачається, що курсова стійкість може бути забезпечена засобами системи керування рухом, а вимоги до маневреності формулюються так, щоб діаметр сталої циркуляції D_C не перевищував допустимого значення $|D_C|$:

$$D_c \leq |D_c| \quad (4.15)$$

Мореплавність судна оцінюється за умовами обітаємості екіпажу та можливістю експлуатації обладнання при впливі вітрово-хвильових режимів району плавання. Умови вважаються виконаними, якщо переміщення s , швидкості $\dot{s}$ і прискорення $\ddot{s}$, що виникають під час руху судна, не перевищують критичних значень $|s|$, $|\dot{s}|$ і $|\ddot{s}|$:

$$s < |s|, \dot{s} < |\dot{s}|, \ddot{s} < |\ddot{s}| \quad (4.16)$$

Модель інженерно-навігаційних властивостей судна, розроблена для етапу концептуального проектування, передбачає певні спрощення. Зокрема, оскільки маса судна визначається за структурою ESWBS на основі даних побудованих

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.04	Арк.
						46
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

аналогів, які вже мають достатню товщину елементів корпусу для забезпечення міцності та необхідну кількість водонепроникних перебірок для гарантування непотоплюваності, умови (4.12) і (4.13) можуть не розглядатися на цьому етапі. Їх перевірку доцільно проводити під час подальших стадій проєктування судна, коли деталізуються конструктивні елементи та уточнюються експлуатаційні параметри [22] [31].

4.3. Модель експлуатації балкера.

Модель експлуатації балкера створюється з метою дослідження основних операцій, які судно виконує протягом продуктивних періодів свого життєвого циклу. Вона відображає послідовність транспортних процесів, технічних дій та взаємодію з портовими структурами в межах одного повного рейсу [23].

Для балкера, що працює у режимі послідовних рейсів, принципова схема його функціонування наведена на рисунку 4.2. При побудові такої моделі приймається, що судно здійснює регулярні кругові рейси між двома портами — №1 Баликпапан (Індонезія) та №2 Шеньчжень (Китай). У прямому напрямку судно виконує перевезення вантажу з порту відправлення, далі здійснює транзитне плавання та розвантажується в порту прибуття. Після завершення операції вивантаження балкер здійснює зворотний перехід до порту Баликпапан, де цикл повторюється. Основною транспортною операцією судна є рейс «туди і назад», який утворює базовий елемент експлуатаційної моделі.

У цьому дослідженні розглядатиметься один круговий рейс, виконаний у квітні, що дозволить оцінити вплив сезонних метеорологічних умов цього періоду на ефективність експлуатації судна. Квітень характеризується перехідним мусонним періодом у регіоні Південнокитайського моря, що впливає на напрям і силу вітрів, а також на гідрометеорологічні умови маршруту. Це дає змогу більш об'єктивно оцінити поведінку судна в умовах змінної навігаційної обстановки.

При ймовірнісному підході до аналізу експлуатаційних операцій характеристики розглянутого процесу визначаються двома способами: із використанням теорії випадкових подій та теорії випадкових функцій. Теорія випадкових подій застосовується для визначення показників надійності судна,

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.04	Арк.
						47
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

ґрунтуючись на законах додавання та множення ймовірностей подій, що супроводжують виконання рейсу. Ефективність експлуатації оцінюється за допомогою апарату теорії випадкових функцій, який дозволяє відобразити випадковий характер зміни параметрів, що описують людські, матеріальні та фінансові ресурси, а також часові показники операцій. Використання цих алгоритмів дає змогу перетворити вхідні випадкові величини у вихідні експлуатаційні індикатори, що характеризують ефективність судна протягом одного повного рейсу [23], [18].

4.3.1. Імовірнісні характеристики надійності балкера.

Експлуатаційна операція «туди і назад» (позначена як F) вважається реалізованою за умови, що відбуваються дві події:

- судно здійснює вихід у рейс у сприятливих погодних умовах району експлуатації (подія F₁);
- рейс виконується повністю відповідно до заданих умов маршруту (подія F₂).

Таким чином, подію F можна подати у вигляді добутку $F = F_1 \times F_2$, а ймовірність її здійснення визначається за формулою

$$P[F] = P[F_1] \times P[F_2 | F_1] \quad (4.17)$$

де $P[F_1]$ - ймовірність події F₁, $P[F_2 | F_1]$ - умовна ймовірність події F₂, то є ймовірність, розрахована за умови, що подія F₁ сталося.

Ймовірність $P[F_1]$ характеризує надійність експлуатації судна та визначається частотою зустрічі судна зі сприятливими метеорологічними умовами в районі плавання, за яких технічні можливості дозволяють реалізувати транспортну операцію..

Згідно зі схемою на рисунку 4.2, виконання кругового рейсу супроводжується трьома основними операціями: завантаженням у порту №1 (подія F₂₁), перевезенням вантажу між портами (подія F₂₂) та розвантаженням у порту №2 (подія F₂₃). Рейс вважається реалізованим тоді, коли всі ці події виконуються одночасно, тобто ($F_2 = F_{21} \times F_{22} \times F_{23}$).

Відповідно, ймовірність здійснення повного рейсу визначається як

$$P[F_2 | F_1] = P[F_{21}] \times P[F_{22}] \times P[F_{23}] \quad (4.18)$$

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.04	Арк.
						48
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

де $P[F_{21}]$ - ймовірність завантаження судна в порту № 1, $P[F_{22}]$ - ймовірність перевезення вантажу в порт №2, $P[F_{23}]$ - ймовірність вивантаження судна в порту №2.

Подія $\bar{F}$, що полягає в тому, що операція в обидва кінці не була здійснена, є подією, протилежною події F . Подія $\bar{F}$, протилежній події F_1 , відповідає ситуації, коли судно не виходить у рейс через несприятливі або штормові погодні умови в районі експлуатації. Подія $\bar{F}$, навпаки події F_2 , має місце, якщо на будь-якому етапі поїздки в обидва кінці трапляється аварія, що тягне за собою її нереалізацію. Для обчислення ймовірностей $P[\bar{F}]$, $P[\bar{F}_1]$ та $P[\bar{F}_2 | F_1]$ протилежних подій використовуються такі вирази:

$$P[\bar{F}] = 1 - P[F], P[\bar{F}_1] = 1 - P[F_1], P[\bar{F}_2 | F_1] = 1 - P[F_2 | F_1] \quad (4.19)$$

Для малих значень ймовірностей $P[\bar{F}_{21}], P[\bar{F}_{22}], P[\bar{F}_{23}], P[\bar{F}_{24}]$ подій, $\bar{F}_{21}, \bar{F}_{22}, \bar{F}_{23}, \bar{F}_{24}$, ми маємо приблизну залежність

$$P[\bar{F}_2 | F_1] \approx P[\bar{F}_{21}] + P[\bar{F}_{22}] + P[\bar{F}_{23}] = \sum_{k=1}^3 P[\bar{F}_{2k}] \quad (4.20)$$

отримано розкладанням залежностей (4.11) у ряди Тейлора за степенями цих малих величин.

Значення ймовірності $P[\bar{F}_2 | F_1]$ аварій на судні, зменшене до одного року, тобто написаний у формі $P[\bar{F}_2 | *]$, як правило, дає офіційну статистику нещасних випадків.

Для того, щоб перейти до аналізу впливу видів аварій та їх тяжкості (вразливість судна) на коефіцієнт аварій, вводяться наступні групи випадкових подій: група подій за типом аварій T_i , $i = 1, 2, \dots, I$, і відповідає кожному типу аварій групи тяжкості аварії L_{ik} , $k = 1, 2, \dots, K_i$, де K_i - загальна кількість градацій тяжкості.

За допомогою введених груп подій ймовірність $P[A]$ аварії A під час продуктивного використання судна визначається за формулою

$$P[A] = \sum_{i=1}^I P[T_i] \times \left\{ \sum_{k=1}^{K_i} P[L_{ik}] \right\} \quad (4.21)$$

Якщо кожен рівень тяжкості пов'язаний з величиною фінансової шкоди C_{ik} , $k = 1, 2, \dots, K_i$, загальний фінансовий збиток C від аварій за час, коли судно виконує транспортні операції, дорівнює

$$C = \sum_{i=1}^l P[T_i] \times \left\{ \sum_{k=1}^{K_i} P[L_{ik}] \times C_{ik} \right\} \quad (4.22)$$

У цих співвідношеннях значення ймовірностей $P[T_i]$, $P[L_{ik}]$ та величини C_{ik} можуть бути отримані на основі офіційної статистики аварійності суден або в результаті моделювання надзвичайних ситуацій під час вантажно-розвантажувальних і транспортних операцій із застосуванням методів статистичного випробування (методу Монте-Карло) [5], [24], [20].

4.3.2. Складні показники ефективності та надійності балкера.

Ринкові дані щодо вартості матеріалів, устаткування та технічних систем, що застосовуються у суднобудуванні, свідчать про їх значну мінливість і низьку передбачуваність. У зв'язку з цим вважається доцільним, щоб уже на початковому етапі життєвого циклу судна — на стадії його проектування та створення — показники ефективності визначалися комплексними характеристиками, які одночасно враховують як економічну результативність, так і технічну надійність судна. Такі інтегровані показники повинні відображати чисту поточну вартість судна з урахуванням усіх доходів і витрат, пов'язаних з його експлуатацією [23], [5].

$$OF_1 = \sum_{l=1}^L (P_{ll} \bar{I}_l - \bar{E}_l) - \bar{B} \quad (4.22)$$

$$OF_2 = \frac{\sum_{l=1}^L (\bar{E}_l) + \bar{B}}{\prod_{i=1}^M P_i} \quad (4.23)$$

де P_{ll} - ймовірність отримання доходу за l -у половину поїздки, $\bar{I}_l$, $\bar{E}_l$ і $\bar{B}$ - середній дохід, витрати та вартість будівництва судна, $\prod_{i=1}^M P_i$ - ймовірність виконання судном основних функціональних операцій.

Під час пошуку оптимального конструктивного рішення судна перший показник (OF_1) підлягає максимізації, оскільки він відображає економічну вигідність і потенційний прибуток експлуатації, тоді як другий показник (OF_2)

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.04	Арк.
						50
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

мінімізується для досягнення найменших витрат при забезпеченні необхідного рівня технічних характеристик та функціональних можливостей судна. [25].

Водночас у цих індексах представлення надійності є узагальненим і не повністю враховує усі експлуатаційні ризики. Повніше відображення факторів надійності досягається під час формування системи обмежень у процесі постановки задачі оптимізації на етапі дослідницького або передпроектного опрацювання судна. Це дозволяє інтегрувати показники надійності, економічної стійкості та технічної ефективності в єдину модель оцінки доцільності конструктивного рішення. [7], [9].

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.04	Арк.
						51
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

4.4. Постановка задачі оптимізаційного вибору основних розмірів балкера.

На кафедрі теорії і проектування суден НУК професор Некрасов В.О. розробив всеосяжний підхід до аналізу функціонування рухомих морських систем, який передбачає оцінювання їхньої ефективності за критеріями продуктивності та надійності, а також синтез оптимальних проектних рішень як для окремих одиниць, так і для їхніх угруповань, що мають реалізовувати конкретні практичні завдання [14].

Під час вирішення питань суднобудування на верфях ураховують різні типи суден і їх призначення. Зазвичай тривалість експлуатації судна визначається через поняття «життєвого циклу», який починається з етапу проектування, охоплює будівництво, експлуатацію, капітальні ремонти і завершується утилізацією чи модернізацією. Упродовж експлуатаційного періоду враховується специфіка використання суден у конкретних районах, де вони виступають складовими транспортно-логістичних систем, морських добувних комплексів або обслуговуючих інженерних споруд.

Ці морські об'єкти функціонують під впливом зовнішніх чинників — вітру, хвиль і кліматичних навантажень — що позначається на їхній енергетичній ефективності, остійності, надійності та довговічності. Протягом життєвого циклу суден визначається їх взаємодія з проектними, фінансовими, будівельними й експлуатаційними структурами, а також організаціями, які здійснюють технічну підтримку та оновлення суден [1].

У межах цього процесу часто розглядаються питання інвестування — як у створення нових морських об'єктів, так і в забезпечення безперервності їх функціонування протягом експлуатаційного строку. Це дозволяє узгодити технічні, економічні та організаційні аспекти суднобудування в єдину систему, орієнтовану на підвищення ефективності морських перевезень і безпеки суден.

У моделі оптимального проектування комерційних морських об'єктів цільова функція може бути виражена через показник чистої теперішньої вартості (NPV — Net Present Value), який враховує як початкові капітальні витрати, так і майбутні доходи та експлуатаційні витрати протягом усього життєвого циклу судна — від етапу проектування до утилізації або модернізації

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.04	Арк.
						52
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

$$OF_1 = \sum_{j=1}^J \frac{I_j - E_j}{(1+i)^j} \quad (4.24)$$

де підсумовування середньорічного прибутку $\bar{I}_j - \bar{E}_j$ поширюється на всі роки j життя об'єкта, а значення i - це ставка дисконтування, яка враховує рівень інфляції та інші ризики інвестування у відповідний сектор економіки.

Використовуючи наведені вище цільові функції, задачу пошуку оптимального конструктивного рішення для рухомого морського об'єкта (наприклад, балкера) або для їх сукупності (флоту) можна сформулювати так: необхідно визначити такий набір проектних параметрів корпусу, енергетичної установки й експлуатаційних режимів, який за заданих технічних, технологічних та нормативних обмежень максимізує (або мінімізує) обраний критерій ефективності — від економічних показників життєвого циклу до індексів надійності та безпеки. Інакше кажучи, розв'язується багатокритеріальна оптимізаційна задача з пріоритизацією цілей (або їх агрегацією в єдину цільову функцію), де змінними є геометрія й масово-інерційні характеристики судна, параметри рушійно-енергетичного комплексу, профіль рейсової експлуатації, а також організаційні рішення щодо складу і взаємодії одиниць флоту.

Знайти: $OF\{U, x\} \Rightarrow \text{extr}$ (4.25)

в: $EN(X) \geq 0, \quad N = 1, 2, 3; \quad (4.26)$

$FK(X) \geq [FK], \quad K = 1, 2, \dots, K; \quad (4.27)$

$PKL[PT] \leq [PKL], \quad L = 1, 2, \dots, L; \quad (4.25)$

$x \leq x_Q, \quad Q = 1, 2, \dots, Q \quad (4.26)$

Використовуючи зазначені цільові функції, у процесі оптимального проектування рухомих морських об'єктів застосовуються також системи обмежень, що забезпечують досягнення заданого рівня ефективності, безпеки та надійності конструкції [14], [1].

Зокрема, $En(x) \geq 0$ — це обмеження, які гарантують необхідний рівень функціональної ефективності судна. До них належать вимоги щодо плавучості,

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.04	Арк.
						53
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

вантажомісткості, навігаційної придатності та наявності основних допоміжних систем — таких як аварійно-рятувальні, пожежогасіння, системи ліквідації розливів нафти, радіолокаційні станції для контролю охорони акваторії, а також бортові захисні та спеціалізовані комплекси.

$F_k(x) \geq [F_k]$ — це обмеження, пов'язані з показниками надійності, які характеризують здатність судна безперервно виконувати свої функції за умов дії експлуатаційних навантажень. До таких показників належать остійність, непотоплюваність, керованість, міцність і морехідність, а також надійність функціонування основних технічних і енергетичних підсистем судна [30]. $[F_k]$ — це нормативні значення показників надійності, які встановлюються відповідними класифікаційними товариствами згідно з міжнародними правилами (IACS, DNV, Lloyd's Register, Bureau Veritas тощо).

Додатково вводяться $PKL[ПТ] \leq [PKL]$ — обмеження, що визначають граничні обсяги фінансових ресурсів, необхідних для проектування, будівництва, експлуатації рухомого морського об'єкта, а також для покриття можливих витрат, пов'язаних із заподіяною шкодою навколишньому середовищу. $[PKL]$ позначає максимально допустимі значення цих фінансових фондів відповідно до техніко-економічних умов.

Вектор U описує параметри зовнішнього середовища та умови технічного завдання,

x — вектор незалежних змінних, тобто основних елементів судна (довжина, ширина, осадка, коефіцієнти форми корпусу тощо),

а x_q — це вектор обмежень незалежних змінних, що задає допустимі межі для цих параметрів у процесі оптимізації [14].

4.5. Опис алгоритму вирішення задачі оптимізації.

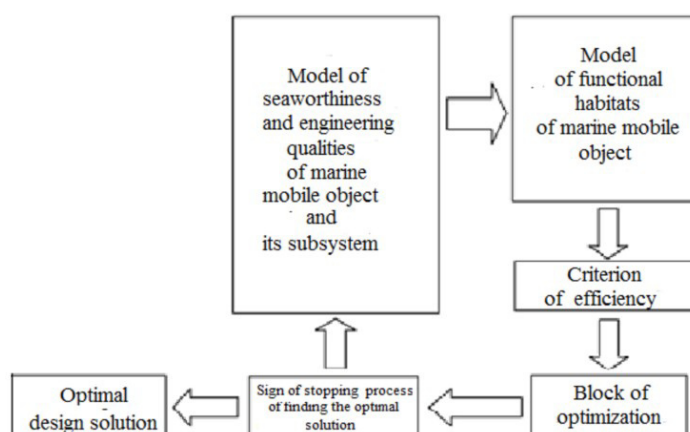


Рисунок 4.5.1 - Структурна схема пошуку оптимального рішення проблеми синтезу морського рухомого об'єкта для умов їх експлуатації.

Відповідно до наведеної схеми, у процесі пошуку оптимального проєктного рішення рухомий морський об'єкт проходить низку послідовних «занурень» у середовище існування протягом усього життєвого циклу [23], [19]. Під час кожного такого «занурення», що виконується за допомогою імітаційного моделювання, відтворюється виконання основних експлуатаційних операцій судна. У ході цього процесу визначаються показники ефективності та надійності, що характеризують ступінь пристосованості судна до умов середовища та його здатність якісно реалізовувати основний комплекс функцій. У блоці оптимізації здійснюється порівняння отриманих варіантів проєктних рішень і вибирається найкоротший напрямок руху до головної цілі оптимізації. Процес пошуку оптимального рішення завершується, коли досягаються задані критерії ефективності та надійності [8].

Кожен етап пошуку пов'язаний із перетворенням імовірнісних характеристик випадкових величин, які описують стохастичний характер зовнішніх та внутрішніх чинників (коливання цін на матеріали, зміни погодних умов, варіації експлуатаційних витрат), у ймовірнісні характеристики результатів діяльності судна — прибутку, витрат на проєктування, будівництво й експлуатацію.

Передбачається, що при переході випадкових параметрів до різних

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.04	Арк.
						55
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

часових інтервалів вони залишаються представниками безперервних марковських процесів, що описують зміну станів судна в часі [20].

Комплексний метод дослідження функціонування рухомих морських об'єктів, оцінювання ефективності їх експлуатації за критеріями продуктивності й надійності, а також синтез оптимальних проєктних рішень як для окремих суден, так і для груп суден, призначений для практичного використання під час вирішення конструкторських завдань у суднобудуванні. Такий підхід може застосовуватись як для проєктування нових суден, так і для вибору з існуючого світового флоту тих, що найбільше відповідають технічним та економічним вимогам експлуатації [14].

Вибір основних розмірів судна ґрунтується на моделюванні виконання його функціональних операцій у заданій зоні плавання. Моделювання здійснюється із застосуванням моделей технічних та морехідних характеристик, побудованих на основі сучасних методів гідроаеродинаміки та теорії випадкових функцій [8], [17].

Окрім характеристик корпусу, у моделі враховується середовище функціонування судна, включаючи особливості портової інфраструктури, умови переробки вантажів і можливість утилізації після завершення терміну служби. Погодні умови заданого району експлуатації враховуються у вигляді довгострокових статистичних розподілів параметрів вітру, хвиль і течій [32].

Ефективність, надійність і безпека експлуатації судна оцінюються за комплексним показником типу, який виступає критерієм оптимізації. Аналіз процесу виконується за допомогою алгоритму оптимізації, у якому цей критерій використовується як цільова функція [18]. Програмний комплекс реалізує підхід до вибору основних розмірів для широкого спектра суден — від балкерів і танкерів до контейнеровозів, буксирів, рятувальних і патрульних суден [9].

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.04	Арк.
						56
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

4.6. Програмний комплекс для вирішення задачі оптимізації.

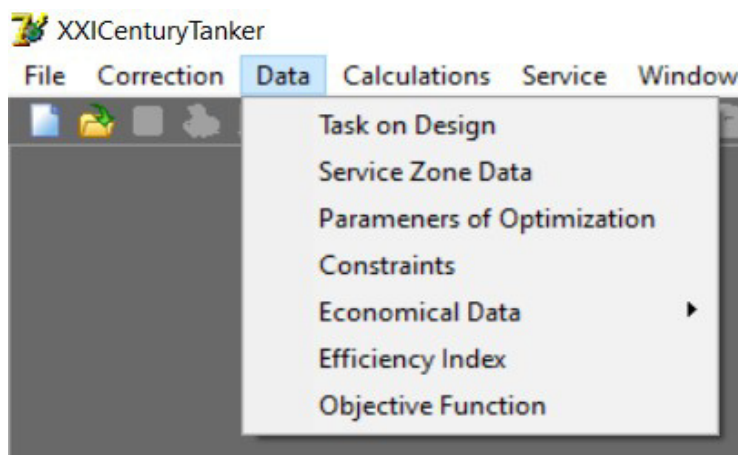


Рис 4.6.1 - Головне вікно програми

Рис 4.6.2 - Вікно дизайнерського завдання

Рис 4.6.3 - Вікно даних зони обслуговування

Parameters of solution search

Parameters Variables Values

Number of Variables: 6

Initial Step: 0.10000

Penalty Coefficient: 0.10000000

Exactness of Calculation: 0.10000000

Penalty for non-discreteness: 0.01000000

Exactness for Integralness: 0.00100000

Parameter for b-function: 2.14000

☒ Convergence

Search: ☒ Maximum ☐ Minimum

Discreteness of Variables: ☒ No ☐ Yes

Output of Results: ☐ Do not ☐ Drawn by Iterations ☒ Results of Iterations and Tolerance Values

Ok Cancel

Рис 4.6.4 - Вікно параметрів пошуку рішення

Stochastic Data

I DESIGN EXPENSES

Rate of Design Costs, % >>

II BUILDING EXPENSES

Cost of 1 ton of ship constructions, \$/t >>

Cost of 1 ton of Propulsive Plant, \$/t >>

Cost of 1 ton of Electrical Plant, \$/t >>

Cost of 1 ton of Control and Surveillance, \$/t >>

Cost of 1 ton of Auxiliary Systems, \$/t >>

Cost of 1 ton Outfit and furnishings, \$/t >>

Rate of Productivity of 1 Worker, reg. t >>

Average Salary of Shipbuilder, \$/month >>

Duration of Ship Construction, months >>

III MAJOR OVERHAUL AND RECYCLING EXPENSES

Rate of Major Overhaul Costs, % >>

Cost of 1 ton Ship Scrapping, \$/t >>

IV OPERATION EXPENSES

Price of 1 ton of Foil, \$/t >>

Price Of 1 ton of Oil, \$/t >>

Rate of Supply Costs, % >>

Repair and Maintenance Costs, % >>

Average Salary of Crew, \$/month >>

Rate of Undirect Expenses, % >>

Rate of Ship Insurance, % >>

V INCOME

Freight Rate of Load No. 1, \$/t >>

Freight Rate of Load No. 2, \$/t >>

OK Cancel

Рис. 4.6.5 - Вікно економічних стохастичних даних

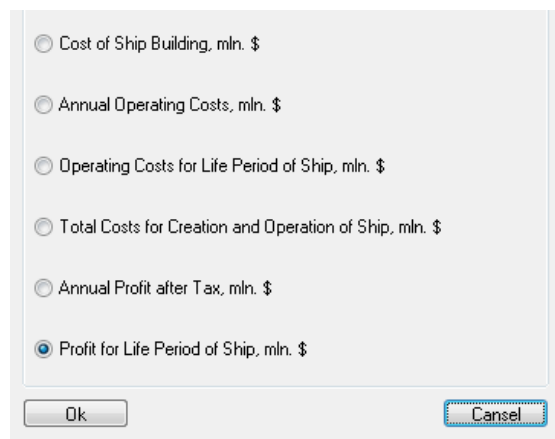


Рис. 4.6.7 - Вікно показників економічної ефективності

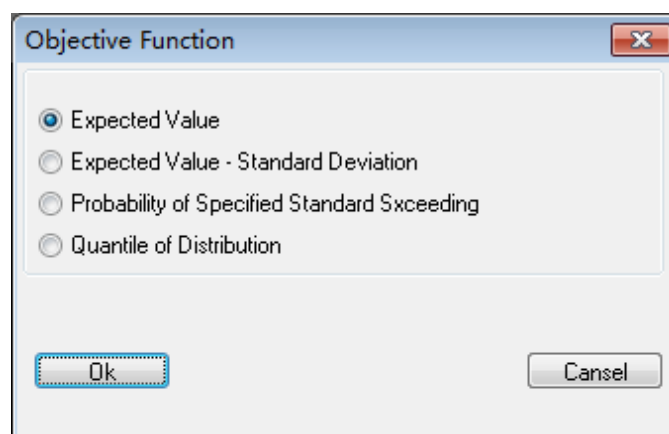


Рис 4.6.8 - Вікно цільових функцій

4.7. Концептуальний проект балкера.

DESIGN ASSIGNMENT

Objective Function Type	6
1. Cost of Ship Building, mln. \$	
2. Annual Operating Costs, mln. \$	
3. Operating Costs for Life Period of Ship, mln. \$	
4. Total Costs for Creation and Operation of Ship, mln. \$	
5. Annual Profit after Tax, mln. \$	
6. Profit for Life Period of Ship, mln. \$	
Extremum of Objective Fuction (1: minimum, -1: maximum).....	-1
Endurance, days	10
Crew, men	18
Seakeeping, states	7
Type of main engine	Average-speed
Engine number	1

CALCULATION RESULTS:

Main Dimensions:

Length, m..... 217.3
 Breadth, m..... 32.2
 Draught, m..... 12.2
 Depth, m..... 18.8
 Block coefficient C_b 0.833
 Middle section coefficient C_m 0.979
 Waterline area coefficient C_w 0.824
 Volume Displacement V , m^3 71108.1

Model of Main Engine
 Power of Main Engine N_e , kW 13630.9
 Speed V_s , knots 15.0

Mass of constructions, t..... 15991.2
 Mass of propulsion plant, t..... 2325.1
 Mass of electrical plant, t..... 568.5
 Mass of control system, t..... 43.7
 Mass of auxiliary system, t..... 1027.7
 Mass of equipment and furniture, t..... 1975.2
 Mass of ballast, t..... 0.00
 Light displacement, t..... 21931.3
 Mass of crew and provisions, t 2.8
 Mass of freshwater marine, t..... 36.0
 Mass of ship fuel and oil, t..... 810.1
 Mass of Load 1 in HalfTrip 1, t 49999.7
 Mass of Load 2 in HalfTrip 2, t 49999.1
 Deadweight, t..... 50848.6
 Displacement full, t..... 72780.0

Vertical ship gravity center, m..... 11.4
 Vertical ship buoyancy center, m..... 6.1
 Transversal metacentric radius, m..... 5.5
 Initial metacentric height, m..... 0.2
 Maximum righting lever arm, m..... 1.9
 Angle of maximum lever arm, deg..... 55.0
 Angle of vanishing stability, deg..... 88.0
 Criteria of stability..... 50.0

Angle of heel from people accumulation on side of ship, deg.... 0.0
 Heeling angle from people accumulation during circulation, deg. 5.6

Period of free rolling, sec..... 67.802

					24. MP.135. 6112M.04.П3.04	Арк.
						60
Зм.	Архив	№ докум.	Підпис	Дата		

INDEXES OF SHIP EFFICIENCY AND RELIABILITY:

(Corresponding to the Type of Objective Function)

Time of Circular Trip, hours	453
Freight rate of Load 1 in HalfTrip 1, \$/t	36.74
Value of Load 1 in HalfTrip 1, t	50000
Freight rate of Load 2 in HalfTrip 2, \$/t	38.00
Value of Load 2 in HalfTrip 2, t	49999
Time of HalfTrip 2, hours.....	226
Number of Circular Trip per year	20
Probability of Transport Operations Fulfillment	1.000
Daily cost of the ship, \$/day	8548.40
Minimum Time-Charter, \$/day	89376.55
Minimum Freighter daily expenses, \$/day	119419.20
Minimum needed Freight rate, \$/t	22.54
Reduced Costs, \$/t per year	22.58
Income from Trip, mln.\$	3.737117
Income from HalfTrip 2, mln.\$	1.868559
Income per year, mln.\$	73.285384
Expenses per operation year, mln.\$	47.801192
Annual Profit (after taxes), mln.\$	20.727407
Cost of Ship Design and Building, mln.\$	156.114619
Total Costs for Creation and Operation of Ship, mln. \$	717.335561
Profit of Ship Life Period (24 years), mln.\$	466.366658

Оптимальні основні розміри та масове навантаження судна

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.04	Арк.
						61
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

CONSTRAINTS(RESTRICTIONS):

Name	Value	Constraints
1 Maximum time of circular trip, hours	452.972	240.000
2 Maximum length of constructive waterline, m	217.300	218.000
3 Maximum draught of ship, m	12.200	12.300
4 Maximum error of displacement calculation, %	0.145	1.000
5 Maximum full speed, knts	15.000	15.500
6 Maximum breadth of ship, m	32.200	32.300
7 Maximum B/d	2.639	2.640
8 Maximum H/d	1.545	1.295
9 Maximum L/B	6.748	6.000
10 Maximum power of main engine, kW	13630.943	13800.000
11 Maximum value of block coefficient	0.833	0.834
12 Maximum value of middle section coefficient	0.979	0.995
13 Maximum value of waterline coefficient	0.824	0.910
14 Maximum roll angle from accumulation of people on ship board, deg.	0.017	10.000
15 Maximum roll under people on board and circulation, deg.	5.586	10.000
16 Minimum time of circular trip, hours	452.972	220.000
17 Minimum length of constructive waterline, m	217.300	216.000
18 Minimum breadth of ship, m	32.200	32.100
19 Minimum value of initial GM, m	0.175	3.500
20 Minimum draught of ship, m	12.200	12.100
21 Minimum full speed, knts	15.000	14.900
22 Minimum B/d	2.639	2.600
23 Minimum H/d	1.545	1.500
24 Minimum L/B	6.748	6.470
25 Minimum power of main engine, kW	13630.943	13600.000
26 Minimum value of block coefficient	0.833	0.825
27 Minimum value of maximum GZ, m	1.930	2.000
28 Minimum value of GZ maximum angle, deg.	55.000	50.000
29 Minimum value of vanishing stability angle, deg.	88.015	60.000
30 Weather criterion >1	49.993	1.000
31 Minimum value of roll period, s	67.802	12.000
32 Maximum error of hull volume for loads, %	0.302	0.500

Рис 4.7.1 - Характеристики остійності та показники ефективності та надійності

Result 3 – Optimization Output

Initial value of the Objective function: OF = 0.0022

Iteration: 0 Number of Objective function calculations: N = 2

Value of Objective function with Constraints influence: OFc = -2 132 412.21166

Values of Independent variables:

X[1] = 217.300 X[2] = 32.200 X[3] = 12.200

X[4] = 18.850 X[5] = 0.833 X[6] = 15.000

Values of Constraints (are not satisfied if they have negative sign):

Ог.1. = -0.47202 Ог.2. = 0.00322 Ог.3. = 0.00820

Ог.4. = 6.00649 Ог.5. = 0.03333 Ог.6. = 0.00311

Ог.7. = 0.00025 Ог.8. = -0.16186 Ог.9. = -0.11091

Ог.10. = 0.01240 Ог.11. = 0.12005 Ог.12. = 0.01634

Ог.13. = 0.10434 Ог.14. = 577.91243 Ог.15. = 0.79017

Ог.16. = 1.06621 Ог.17. = 0.00602 Ог.18. = 0.00312

Ог.19. = -0.95010 Ог.20. = 0.00826 Ог.21. = 0.00671

Ог.22. = 0.01513 Ог.23. = 0.03005 Ог.24. = 0.04304

Ог.25. = 0.00228 Ог.26. = 0.00970 Ог.27. = -0.03492

Ог.28. = 0.10000 Ог.29. = 0.46691 Ог.30. = 48.99270

Ог.31. = 4.65016 Ог.32. = -0.98347

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.04	Арк.
						62
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

Iteration: 1 Number of Objective function calculations: N = 31

Value of Objective function with Constraints influence: OFc = -2 126 220.31029

Values of Independent variables:

X[1] = 217.300 X[2] = 32.200 X[3] = 12.200

X[4] = 18.850 X[5] = 0.833 X[6] = 15.000

Values of Constraints:

Or.1. = -0.47144 Or.2. = 0.00322 Or.3. = 0.00820

Or.4. = 5.98974 Or.5. = 0.03333 Or.6. = 0.00311

Or.7. = 0.00025 Or.8. = -0.16186 Or.9. = -0.11090

Or.10. = 0.01240 Or.11. = 0.12015 Or.12. = 0.01634

Or.13. = 0.10434 Or.14. = 577.95416 Or.15. = 0.79026

Or.16. = 1.06391 Or.17. = 0.00602 Or.18. = 0.00312

Or.19. = -0.95009 Or.20. = 0.00826 Or.21. = 0.00671

Or.22. = 0.01513 Or.23. = 0.03005 Or.24. = 0.04303

Or.25. = 0.00227 Or.26. = 0.00970 Or.27. = -0.03491

Or.28. = 0.10000 Or.29. = 0.46691 Or.30. = 48.98989

Or.31. = 4.64986 Or.32. = -0.98347

Iteration: 1 Number of Objective function calculations: N = 63

Value of Objective function with Constraints influence: OFc = -2 136 779 205 714.21

Values of Independent variables:

X[1] = 217.300 X[2] = 32.200 X[3] = 12.200

X[4] = 18.850 X[5] = 0.833 X[6] = 15.000

Values of Constraints:

Or.1. = -0.47663 Or.2. = 0.00322 Or.3. = 0.00820

Or.4. = 5.89145 Or.5. = 0.03333 Or.6. = 0.00311

Or.7. = 0.00025 Or.8. = -0.16186 Or.9. = -0.11091

Or.10. = 0.01240 Or.11. = 0.12010 Or.12. = 0.01634

Or.13. = 0.10434 Or.14. = 577.92949 Or.15. = 0.79020

Or.16. = 1.08439 Or.17. = 0.00602 Or.18. = 0.00312

Or.19. = -0.95009 Or.20. = 0.00826 Or.21. = 0.00671

Or.22. = 0.01513 Or.23. = 0.03005 Or.24. = 0.04304

Or.25. = 0.00228 Or.26. = 0.00970 Or.27. = -0.03491

Or.28. = 0.10000 Or.29. = 0.46691 Or.30. = 48.99153

Or.31. = 4.65003 Or.32. = -0.98347

Iteration: 2 Number of Objective function calculations: N = 97

Value of Objective function with Constraints influence: OFc = -2 126 669 565 898.81

Values of Independent variables:

X[1] = 217.300 X[2] = 32.200 X[3] = 12.200

X[4] = 18.850 X[5] = 0.833 X[6] = 15.000

Values of Constraints:

Or.1. = -0.47321 Or.2. = 0.00322 Or.3. = 0.00820

Or.4. = 6.07013 Or.5. = 0.03333 Or.6. = 0.00311

Or.7. = 0.00025 Or.8. = -0.16186 Or.9. = -0.11091

Or.10. = 0.01240 Or.11. = 0.12013 Or.12. = 0.01634

Or.13. = 0.10434 Or.14. = 577.92095 Or.15. = 0.79019

					24. MP.135. 6112M.04.П3.04	Арк.
						63
Зм.	Архуш	№ докум.	Підпис	Дата		

Or.16. = 1.07085 Or.17. = 0.00602 Or.18. = 0.00312
 Or.19. = -0.95010 Or.20. = 0.00826 Or.21. = 0.00671
 Or.22. = 0.01513 Or.23. = 0.03006 Or.24. = 0.04304
 Or.25. = 0.00228 Or.26. = 0.00970 Or.27. = -0.03491
 Or.28. = 0.10000 Or.29. = 0.46692 Or.30. = 48.99207
 Or.31. = 4.65009 Or.32. = -0.98346

Iteration: 3 Number of Objective function calculations: N = 128

Value of Objective function with Constraints influence: OFc = -2 124 920 223 977.72

Values of Independent variables:

X[1] = 217.300 X[2] = 32.200 X[3] = 12.200

X[4] = 18.850 X[5] = 0.833 X[6] = 15.000

Values of Constraints:

Or.1. = -0.47066 Or.2. = 0.00322 Or.3. = 0.00820
 Or.4. = 6.07171 Or.5. = 0.03333 Or.6. = 0.00311
 Or.7. = 0.00025 Or.8. = -0.16186 Or.9. = -0.11091
 Or.10. = 0.01240 Or.11. = 0.12010 Or.12. = 0.01634
 Or.13. = 0.10434 Or.14. = 577.91263 Or.15. = 0.79017
 Or.16. = 1.06090 Or.17. = 0.00602 Or.18. = 0.00312
 Or.19. = -0.95010 Or.20. = 0.00826 Or.21. = 0.00671
 Or.22. = 0.01513 Or.23. = 0.03006 Or.24. = 0.04304
 Or.25. = 0.00227 Or.26. = 0.00970 Or.27. = -0.03491
 Or.28. = 0.10000 Or.29. = 0.46691 Or.30. = 48.99265
 Or.31. = 4.65015 Or.32. = -0.98346

1.1.1 Results of optimization

Number of calculations of the Objective function: N = 160

Value of the Objective function: 0.00222

Values of Independent variables:

X[1] = 217.300 X[2] = 32.200 X[3] = 12.200

X[4] = 18.850 X[5] = 0.833 X[6] = 15.000

Таблиця 4.1– Дані по концептуальному проєкту судна

1.1.2 Main Dimensions:

Length, m = 217.30
 Breadth, m = 32.20
 Draught, m = 12.20
 Depth, m = 18.85
 Block coefficient Cb = 0.833
 Middle section coefficient Cm = 0.979
 Waterline area coefficient Cw = 0.824
 Mass of constructions, t = 15 991.15
 Mass of propulsive plant, t = 2 325.06
 Mass of electrical plant, t = 568.51
 Mass of control and navigation, t = 43.73
 Mass of auxiliary system, t = 1 027.69
 Mass of outfit and furniture, t = 1 975.21
 Mass of ballast, t = 0.00
 Light displacement, t = 21 931.346

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.04	Арк.
						64
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

Mass of crew and provisions, t = 2.79
 Mass of fresh water stores, t = 36.00
 Mass of fuel and oil stores, t = 672.44
 Mass of useful weight, t = 32.02
 Displacement full, t = 72781.424

Таблиця 4.7.2— Дані по концептуальному проєкту судна

Отже, у цьому розділі сформульовано оптимізаційну задачу вибору основних розмірів балкера на основі комп'ютерного варіантного проєктування. За допомогою програмного комплексу НУК було виконано багатофакторний перебір параметрів, що дозволило оцінити вплив довжини, ширини, осадки та коефіцієнтів повноти на вантажомісткість, енергоефективність та відповідність експлуатаційним обмеженням. Оптимальний набір головних розмірів визначено як такий, що забезпечує мінімізацію експлуатаційних витрат при дотриманні вимог класифікаційних правил та портових лімітів. Отримані результати лягли в основу подальшого етапу проєктування та підтвердили коректність застосованої методики оптимізації.

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.05			
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата				
					Дослідження морехідних якостей проєктного рішення балкера	Літ	Аркуш	Аркушів
Студент	Джула Д. В.					у	66	19
Консульт.	Пащенко Ю.М.					НУК імені адм. Макарова		
Керівник	Пащенко Ю.М.							
Зав. каф.	Некрасов В.О.							

5. Дослідження морехідних якостей проєктного рішення балкера

5.1. Формування теоретичної поверхні балкера.

Для побудови поверхні корпусу балкера було використано програмний комплекс Bentley Engineering, у середовищі якого створено геометричну модель судна наведену на рисунку 5.1.1

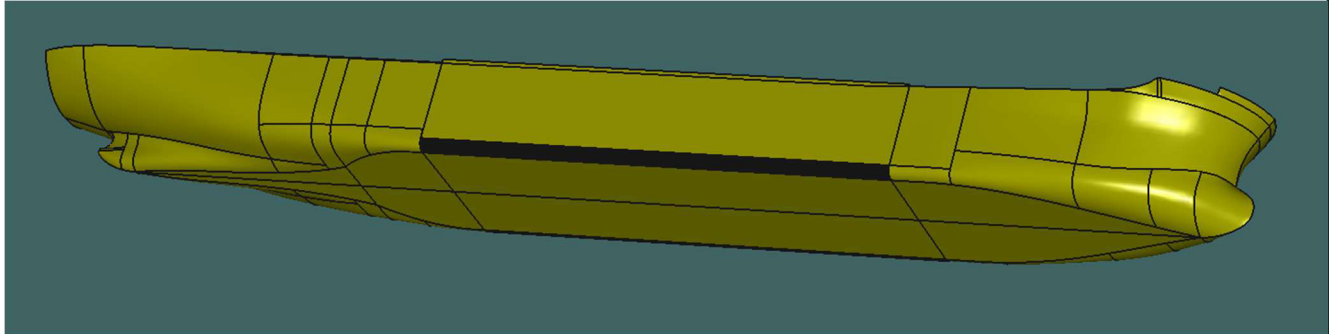


Рис 5.1.1 – Створення поверхні балкера в MaxSurf Modeler

Таблиця 5.1.1 – Основні параметри створення корпусу балкера

Назва	Пояснення	Значення
Length Overall, Loa	Довжина судна	217,3
Beam Overall, Boa	Ширина по ватерлінії	32,2
Deck Height, Hd	Висота борта	18,85

5.2. Розрахунки гідростатики (елементи теоретичного креслення)

Для визначення основних геометричних характеристик корпусу судна виконуються розрахунки гідростатики, що включають побудову елементів теоретичного креслення.. Ці дані формують основу для подальших розрахунків ходовості, остійності та непотоплюваності. На рисунку нижче наведено теоретичне креслення проєктованого балкера, яке відображає отримані геометричні характеристики корпусу.

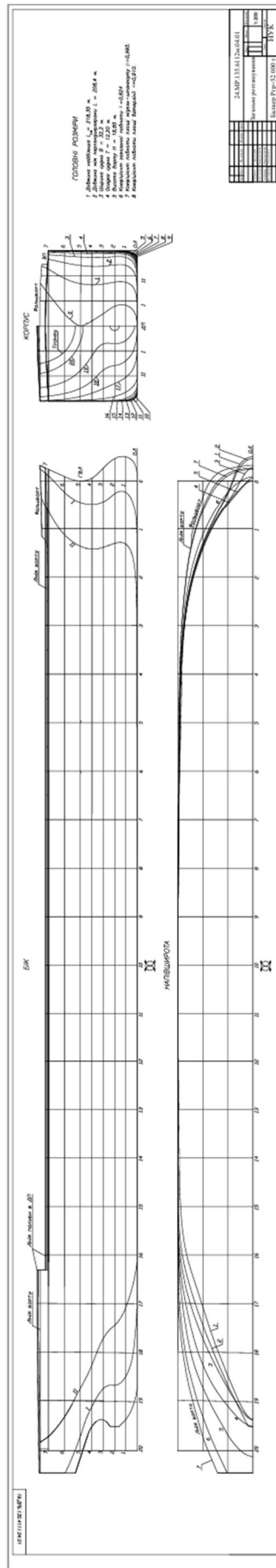


Рис. 5.2.1 Теоретичне креслення

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.05	Арк.
						68
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

Для обчислення статистики судна використовується програмне забезпечення MaxSurfStability. Розрахунок проводиться поетапно (див. Рис. 5.2.2 та 5.2.3).

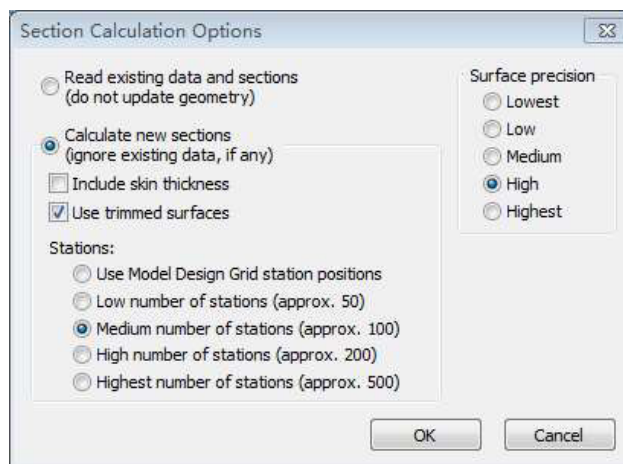


Рис 5.2.2. Відкриваємо msd-файл проєктованого балкера

Проводимо розрахунок елементів теоретичного креслення,

	Draft Amidships m	5,200	6,200	7,200	8,200	9,200	10,200	11,200	12,200
1	Displacement t	28617	34604	40698	46904	53222	59651	66166	72746
2	Heel deg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	Draft at FP m	5,200	6,200	7,200	8,200	9,200	10,200	11,200	12,200
4	Draft at AP m	5,200	6,200	7,200	8,200	9,200	10,200	11,200	12,200
5	Draft at LCF m	5,200	6,200	7,200	8,200	9,200	10,200	11,200	12,200
6	Trim (+ve by stern)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	WL Length m	209,61	209,30	209,66	212,53	214,96	216,09	216,08	216,09
8	Beam max extents	32,159	32,149	32,134	32,120	32,163	32,173	32,164	32,147
9	Wetted Area m ²	7327,5	7808,2	8313,1	8787,2	9296,1	9787,0	10261,	10698,
10	Waterpl. Area m ²	5792,7	5888,8	6001,8	6110,1	6218,9	6317,5	6390,4	6451,1
11	Prismatic coeff. (Cp)	0,806	0,817	0,825	0,822	0,822	0,826	0,834	0,842
12	Block coeff. (Cb)	0,796	0,808	0,818	0,817	0,816	0,820	0,829	0,837
13	Max Sect. area coe	0,992	0,993	0,995	0,996	0,997	0,997	0,998	0,998
14	Waterpl. area coeff.	0,859	0,875	0,891	0,895	0,899	0,909	0,919	0,929
15	LCB from zero pt. (	11,117	10,477	9,768	8,989	8,164	7,319	6,522	5,796
16	LCF from zero pt. (	8,163	6,678	4,782	2,940	1,109	-0,284	-1,185	-1,827
17	KB m	2,701	3,220	3,742	4,265	4,792	5,321	5,851	6,380
18	KG m	12,200	12,200	12,200	12,200	12,200	12,200	12,200	12,200
19	BMT m	15,989	13,502	11,712	10,359	9,300	8,451	7,753	7,173
20	BML m	586,05	507,64	456,56	417,58	387,80	362,25	337,04	314,33
21	GMt m	6,491	4,523	3,253	2,424	1,892	1,572	1,404	1,353
22	GML m	576,55	498,66	448,10	409,64	380,39	355,37	330,69	308,51
23	KMt m	18,691	16,723	15,453	14,624	14,092	13,772	13,604	13,553
24	KML m	588,75	510,86	460,30	421,84	392,59	367,57	342,89	320,71
25	Immersion (TPc) to	59,375	60,361	61,519	62,629	63,744	64,755	65,502	66,124
26	MTc tonne.m	792,39	828,73	875,85	922,78	972,30	1018,0	1050,8	1077,8
27	RM at 1deg = GMt.	3241,7	2731,4	2310,6	1984,2	1757,8	1636,7	1621,3	1717,9
28	Max deck inclinatio	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
29	Trim angle (+ve by	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Рис. 5.2.3 – Результати розрахунку гідростатики.

Далі слід перейти до вкладки «Графіки», де відображаються гідростатичні криві та коефіцієнти повноти, які за потреби можна експортувати у формат DWG для подальшої роботи. Для цього необхідно обрати послідовність команд «File» – «Export» – «DXF and IGES», задати назву файлу та зберегти його. Після цього файл можна імпортувати до програми AutoCAD, відкривши її, обравши у вкладці «File» потрібний файл на комп'ютері, зазначивши формат «*.dxf» та завантаживши збережений раніше документ.

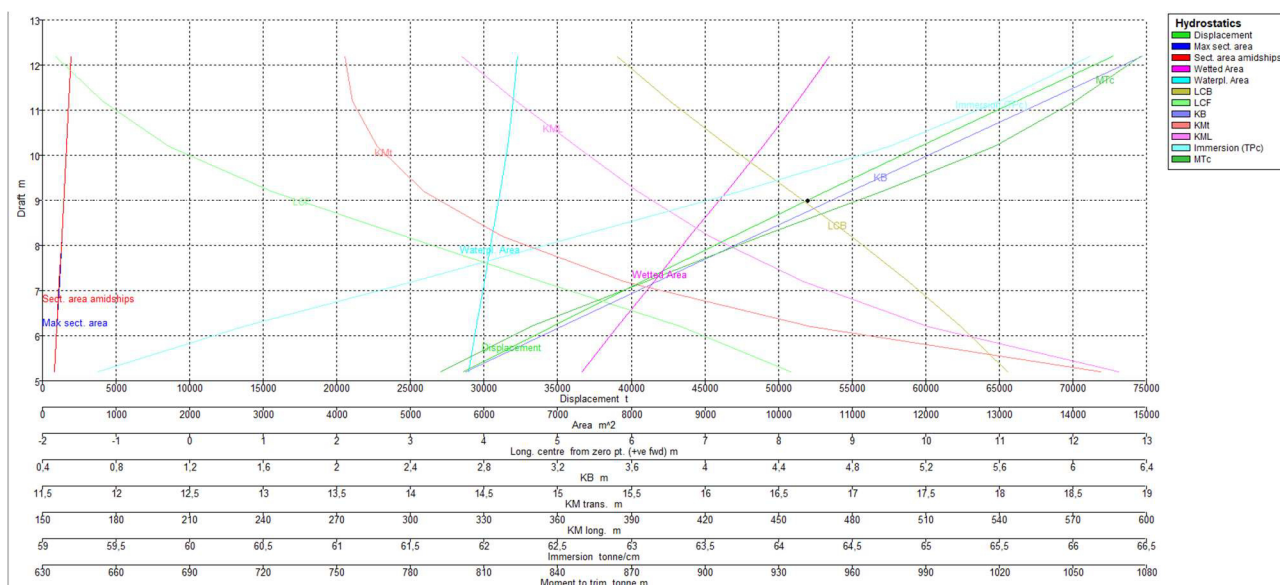


Рис 5.2.4 – Гідростатичні криві - криві теоретичного креслення балкера

5.3. Розрахунок остійності при великих кутах нахилу.

Остійність балкера перевіряємо для судна з повними запасами.

Дані про завантаження судна представлені на рис. 5.3.1.

	Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m³	Total Volume m³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM tonne.m	FSM Type
1	Lightship	1	21746,000	21746,000			-1,401	0,000	7,200	0,000	User Spe
2	Deadweight	1	51000,000	51000,000			0,000	0,000	8,000	0,000	User Spe
3	Total Load			72746,000	0,000	0,000	-0,419	0,000	7,761	0,000	
4	FS correcti								0,000		
5	VCG fluid								7,761		

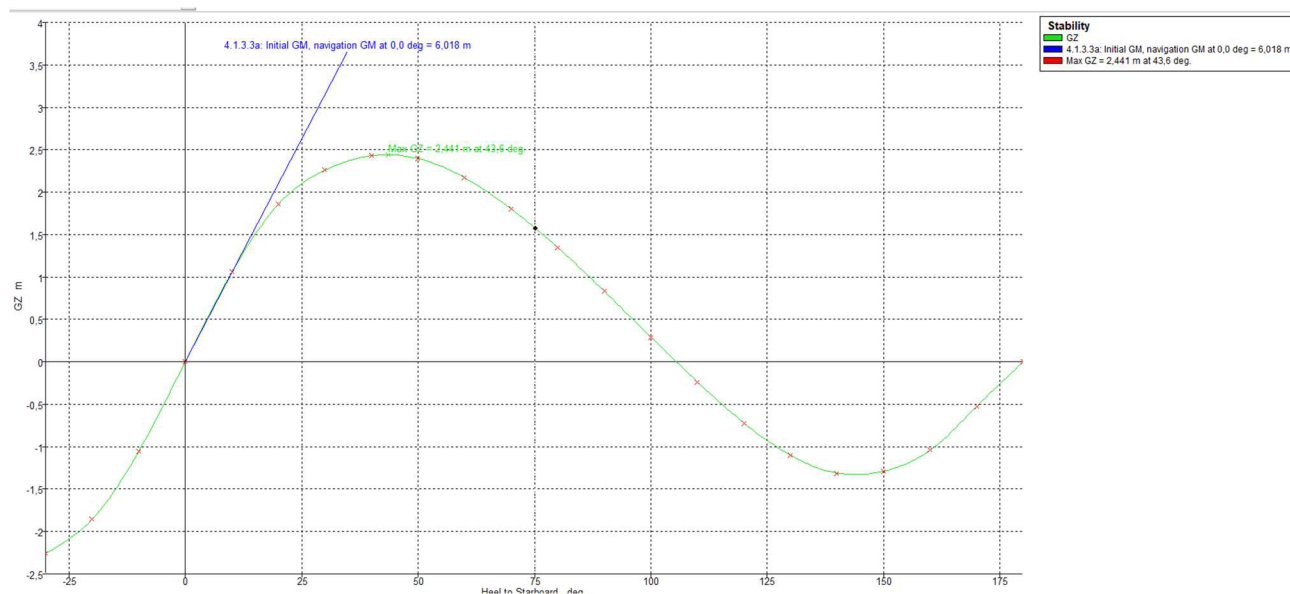
Рис 5.3.1 - Дані масового навантаження судна.

Остійність судна визначається як його здатність після відхилення від положення рівноваги під дією зовнішніх сил самостійно повертатися у початкове положення після припинення їх впливу.

Метою даного розділу є перевірка відповідності характеристик остійності вимогам Регістру судноплавства України. Для цього необхідно побудувати

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.05	Арк.
						70
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

Для виконання розрахунку обирається режим **Large Angle Stability**. У меню «Analysis» необхідно задати величину диференту (за потреби), а також межі початку та завершення побудови діаграми. Далі в меню «Analysis» → «Criteria» визначаються необхідні критерії остійності, відповідно до вимог Регістру судноплавства України. Після виконання розрахунку програма формує діаграму статичної остійності (ДСО), результати якої наведено на рисунку 5.3.2.



	Heel to Starboard deg	-30.0	20.0	-10.0	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0
1	GZ m	-2.58	-1.855	-1.056	0.000	1.056	1.856	2.259	2.429	2.395	2.168	1.802	1.345	0.831	0.293	-0.237	-0.721	-1.103	-1.312	-1.290	-1.042	-0.525	0.000
2	Area under GZ curv	41.054	20.268	5.3875	0.000	5.3903	20.259	41.102	64.702	88.997	111.95	131.89	147.69	158.61	164.23	164.49	159.64	150.41	138.16	124.96	113.108	105.12	102.53
3	Displacement t	72746	72746	72746	72746	72746	72746	72746	72743	72739	72745	72746	72746	72746	72746	72746	72746	72746	72746	72746	72746	72739	72746
4	Draft at FP m	10.074	9.982	10.124	10.109	10.120	9.982	10.081	10.617	11.493	12.841	15.335	22.529	n/a	5.621	-1.562	-4.044	-5.379	-6.320	-7.010	-7.124	-6.996	-6.936
5	Draft at AP m	16.336	14.785	14.154	14.191	14.156	14.782	16.385	18.754	22.505	28.499	39.915	72.896	n/a	55.101	22.120	10.714	4.749	1.162	-0.974	-2.248	-2.753	-2.889
6	WL Length m	216.16	216.14	216.13	216.13	216.13	216.14	216.16	216.18	216.20	218.31	219.54	220.15	219.72	218.43	215.77	211.08	204.76	202.77	208.23	210.01	210.62	210.68
7	Beam max extents	29.550	33.752	32.598	32.127	32.594	33.752	29.542	26.802	24.011	22.214	21.084	20.435	20.234	20.676	21.736	23.410	26.283	27.306	30.396	33.462	32.656	32.151
8	Wetted Area m²	12391.	11808.	10829.	10273.	10829.	11799.	12390.	12766.	12988.	13310.	13225.	13304.	13378.	13456.	13536.	13632.	13723.	13816.	13741.	13360.	13189.	13185.
9	Waterpl. Area m²	4877.9	5545.5	6465.2	6514.8	6464.8	5546.2	4878.7	4479.4	4019.4	3639.7	3392.3	3258.5	3218.0	3268.8	3425.4	3687.6	4105.6	4622.6	5046.2	5621.6	5689.4	5629.5
10	Prismatic coeff. Cp	0.806	0.803	0.801	0.800	0.801	0.803	0.806	0.810	0.814	0.812	0.812	0.815	0.820	0.829	0.844	0.867	0.898	0.906	0.882	0.873	0.866	0.865
11	Block coeff. (Cb)	0.567	0.563	0.669	0.735	0.670	0.563	0.567	0.563	0.580	0.591	0.605	0.624	0.599	0.572	0.550	0.538	0.524	0.556	0.542	0.557	0.632	0.703
12	LCB from zero pt. (	-0.468	-0.463	-0.438	-0.445	-0.445	-0.449	-0.451	-0.472	-0.517	-0.531	-0.562	-0.581	-0.591	-0.590	-0.578	-0.562	-0.538	-0.517	-0.504	-0.488	-0.503	-0.479
13	LCF from zero pt. (	11.150	7.703	-1.110	-3.175	-1.105	7.696	11.130	12.410	11.755	11.755	11.843	12.008	12.108	12.241	12.533	12.195	12.059	13.424	13.522	13.054	11.062	10.714
14	Max deck inclination	30.033	20.036	10.058	1.1233	10.059	20.036	30.033	40.030	50.027	60.023	70.017	80.008	90.000	90.991	109.98	119.97	129.97	139.97	149.96	159.96	169.93	178.88
15	Trim angle (+ve by	1.7226	1.2316	1.1088	1.1233	1.1052	1.3205	1.7178	2.2378	3.0273	4.3004	6.7325	13.598	90.000	13.367	6.4889	0.0542	2.7849	2.0580	1.6606	1.3415	1.1674	1.1138

Остійність суден необмеженого району плавання вважається за критерієм погоди K достатньою, якщо при найгіршому щодо остійності варіанті навантаження динамічно прикладений кренувальний момент від тиску вітру M_v дорівнює або менший, ніж перекидальний момент M_c , тобто якщо дотримані умови $M_v \leq M_c$ або

$$K = \frac{M_c}{M_v} \geq 1,0$$

Обчислюються і порівнюються площі a та b . Площа b обмежена кривою $l(\theta)$ відновлювальних плечей, горизонтальною прямою, що відповідає кренувальному плечу l_{w2} , і кутом крену $\theta_2=50^\circ$. Площа a обмежена кривою відновлювальних плечей прямою l_{w2} і кутом крену, який дорівнює $\theta_0-\theta_1$; Остійність судна за критерієм погоди $K = a / b$ вважається додатною, якщо площа b дорівнює або більша площі a , тобто $K \geq 1$.

Перевірка остійності робиться для 1-го варіанту навантаження проекту, (100% вантажу та 100% запасів)

Амплітуда хитами судна з круглою вилицею обчислюється за формулою:

$$\theta_1 = 109 \cdot K \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot \sqrt{r \cdot S}$$

K – коефіцієнт, що враховує вплив скулових і/або брускового кілів і визначається у відповідності до Правил Регістру; $k = 1$;

X_1 – безрозмірний множник, який визначається в залежності від відношення ширини до осадки B / d :

$$\frac{B}{d} = \frac{32,2}{12,2} = 2,63$$

$$K = 1 \quad X_1 = 0,966$$

X_2 – безрозмірний множник, який визначається в залежності від коефіцієнта загальної повноти судна C_b : $X_2 = 1$

$$r = 0,73 + 0,6(z_g - d)/d = 0,876. \quad C = 0,343$$

$$C = 0,373 + 0,023 \frac{B}{d} - 0,043 \frac{L}{100} = 0,373 + 0,023 \frac{32,2}{12,1} - 0,043 \frac{216}{100} = 0,343$$

S – безрозмірний множник, що визначається в залежності від району плавання судна і періоду хитами T , що розраховується за формулою:

$$T = \frac{2cB}{\sqrt{h}},$$

$$h - \text{метацентрична висота} = 6,018$$

$$\tau = 2 \cdot C \cdot B / h^{1/2} = 2 \cdot 0,343 \cdot 32,1 / 6,018^{1/2} = 8,97 \text{ с}$$

$$S = 0,0713$$

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.05	Арк.
						72
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

S_n — площа парусності;

z — відстань від центра парусності від половини осадки судна;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — прискорення вільного падіння;

D — водотоннажність – 72746 t

Плече

$$l_{w1} = \frac{P_v \cdot A \cdot Z_v}{1000 \cdot g \cdot D}$$
$$l_{w1} = \frac{504 \cdot 1914,1 \cdot 13,618}{1000 \cdot 9,81 \cdot 72746} = 0,0185 \text{ м}$$

Розрахунок плеча кренуючого моменту l_{w2} при дії шквального вітру, виконаний за формулою

$$l_{w2} = 1,5 \cdot l_{w1} = 0,0227 \text{ м}$$

Відкладаємо значення l_{w1} та l_{w2} на діаграмі статичної остійності.

Площі a та b розраховуються графічно.

Критерій погоди

$$K = \frac{b}{a} = \frac{4,7027}{1,5836} = 2,96 \geq 1$$

Таблиця 5.3.2

Величина	Проект	Регістр
K	2,96	$K \geq 1$
$l_{\max}$, м	2,44	$l_{\max} \geq 0,2$
$\theta_{\max}$	43,6	$\theta_{\max} \geq 30^\circ$
$\theta_{\text{зак}}$	105,5	$\theta_{\text{зак}} \geq 60^\circ$
h	6,018 м	0,15 м
S_{30}	0,717 м. рад	0,055 м. рад
S_{40}	1,129 м. рад	0,090 м. рад
$S_{40} - S_{30}$	0,412 м. рад	0,03 м. рад

У даному проєкті кренуючий момент, який створюється підйомною силою роторних вітрил у процесі їх роботи, не враховується окремо у розрахунках остійності та критерію погоди. Це рішення є обґрунтованим із точки зору фізики процесу та практики суднобудування.

По-перше, ефект Магнуса, що виникає при обертанні ротора, генерує підйомну силу, спрямовану переважно горизонтально — тобто уздовж напрямку вітру або під кутом до нього, створюючи переважно рушійний або гальмівний компонент. Вертикальна складова цієї сили, що могла б створювати помітний крен, є незначною.

По-друге, через великі геометричні розміри та водотоннажність судна (понад 72 000 т), навіть сумарна дія трьох ротаторів призводить до еквівалентного статичного крену менше ніж $0,02^\circ$, що відповідає плечу порядку одного міліметра. Такий вплив не має істотного значення для оцінки остійності і знаходиться в межах похибки вимірювання при нормальній експлуатації.

Крім того, у режимі роботи вітрильна система автоматично регулює швидкість обертання роторів, підтримуючи їх симетричне навантаження. Це додатково мінімізує можливість виникнення стійкого крену.

Таким чином, вплив кренуючого моменту від роботи роторів на загальну остійність судна є незначним, і для етапу концептуального проєктування його можна окремо не враховувати.

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.05	Арк.
						75
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

	Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
1	A.749(18)	3.1.2.1: Area 0 to 30				Pass	
2		from the greater of					
3		spec. heel angle	0,0	deg	0,0		
4		to the lesser of					
5		spec. heel angle	30,0	deg	30,0		
6		angle of vanishing stability	105,5	deg			
7		shall not be less than ($\geq$)	3,1513	m.deg	41,1029	Pass	+1204,31
8							
9	A.749(18)	3.1.2.1: Area 0 to 40				Pass	
10		from the greater of					
11		spec. heel angle	0,0	deg	0,0		
12		to the lesser of					
13		spec. heel angle	40,0	deg	40,0		
14		first downflooding angle	n/a	deg			
15		angle of vanishing stability	105,5	deg			
16		shall not be less than ($\geq$)	5,1566	m.deg	64,7029	Pass	+1154,76
17							
18	A.749(18)	3.1.2.1: Area 30 to 40				Pass	
19		from the greater of					
20		spec. heel angle	30,0	deg	30,0		
21		to the lesser of					
22		spec. heel angle	40,0	deg	40,0		
23		first downflooding angle	n/a	deg			
24		angle of vanishing stability	105,5	deg			
25		shall not be less than ($\geq$)	1,7189	m.deg	23,6001	Pass	+1272,97
26							
27	A.749(18)	3.1.2.2: Max GZ at 30 or greater				Pass	
28		in the range from the greater of					
29		spec. heel angle	30,0	deg	30,0		
30		to the lesser of					
31		spec. heel angle	90,0	deg			
32		angle of max. GZ	43,6	deg	43,6		
33		shall not be less than ($\geq$)	0,200	m	2,441	Pass	+1120,50
34		Intermediate values					
35		angle at which this GZ occurs		deg	43,6		
36							
37	A.749(18)	3.1.2.3: Angle of maximum GZ				Pass	
38		shall not be less than ($\geq$)	25,0	deg	43,6	Pass	+74,54
39							
40	A.749(18)	3.1.2.4: Initial GMt				Pass	
41		spec. heel angle	0,0	deg			
42		shall not be less than ($\geq$)	0,150	m	6,018	Pass	+3912,00
43							

Рис 5.3.6 - Перевірка вимог остійності за вимогами ІМО.

За результатами остійності балкер відповідає вимогам ІМО щодо остійності неушкодженого судна.

Висновок

Судно відповідає усім вимогам Регістру судноплавства України за остійністю.

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.05	Арк.
						76
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

5.4. Розрахунок остійності судна в пошкодженому стані.

Непотоплюваність — це властивість судна зберігати свою плавучість і достатню остійність навіть у разі затоплення одного чи кількох відсіків корпусу. Забезпечення непотоплюваності є однією з основних вимог, що гарантують безпеку експлуатації судна.

Характеристики непотоплюваності суден визначаються згідно з вимогами Правил Регістру судноплавства. Судно вважається таким, що відповідає цим вимогам, якщо під час затоплення розрахункових відсіків аварійна ватерлінія в жодній точці не перетинає граничну лінію занурення, проведену на бортах корпусу на 75 мм нижче від краю верхньої палуби.

Основним чинником, який забезпечує непотоплюваність судна, є поділ його корпусу на водонепроникні відсіки за допомогою міцних перебірок. Розташування цих перебірок визначають з урахуванням можливих пошкоджень корпусу та впливу затоплення кожного відсіку на остійність, крен і диферент судна.

На великих суднах, окрім поперечних перебірок, іноді встановлюють і поздовжні водонепроникні перебірки. Проте їхня наявність може призвести до появи небезпечного крену після затоплення вузького відсіку. Для компенсації такого крену на сучасних суднах передбачають системи контрольованого затоплення протилежних відсіків, що дозволяє вирівняти судно без втрати остійності.

Розрахунок непотоплюваності був виконаний у програмі **Maxsurf Stability**. Для цього моделювалося пошкодження корпусу у першому трюмі.

Щоб здійснити розрахунок, необхідно відкрити вікно **Damage Case**, натиснути комбінацію клавіш **Ctrl + A** та поставити позначку біля відсіку, який потрібно вважати пошкодженим (рисунок 5.4.1). Після цього виконується розрахунок удиферентування згідно з описаним вище алгоритмом (таблиця 5.4.2).

Непотоплюваність вважається забезпеченою, якщо в результаті розрахунку аварійна ватерлінія не перетинає граничну лінію занурення.

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.05	Арк.
						77
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

	Room	Intact	DCase 1
1	Forepeak	☐	☐
2	Hold 1	☐	☒
3	Hold 2	☐	☐
4	Hold 3	☐	☐
5	Hold 4	☐	☐
6	Hold 5	☐	☐
7	Hold 6	☐	☐
8	Hold 7	☐	☐
9	ER	☐	☐
10	Aft	☐	☐

Рисунок 5.4.1 – Вибір пошкодженого трюму

Далі для перевірки остійності при першому варіанті пошкодження робимо розрахунок, який описано вище рисунок 5.4.2

	Heel to Starboard deg	-30,0	-20,0	-10,0	0,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	100,0	110,0	120,0	130,0	140,0	150,0	160,0	170,0	180,0
1	GZ m	-2,013	-1,711	-1,070	0,000	1,070	1,711	2,013	2,154	2,193	2,151	2,023	1,811	1,529	1,202	0,852	0,502	0,173	-0,112	-0,339	-0,480	-0,378	0,000
2	Area under GZ curv	38,633	19,860	5,5781	0,0000	5,5816	19,856	38,671	59,602	81,408	103,19	124,14	143,37	160,12	173,80	184,08	190,85	194,20	194,46	192,16	187,93	183,39	181,35
3	Displacement t	72746	72746	72746	72746	72746	72746	72746	72746	72746	72746	72746	72746	72746	72746	72746	72746	72746	72746	72746	72746	72746	72746
4	Draft at FP m	20,112	18,028	16,684	16,333	16,678	18,022	20,111	23,174	27,873	35,819	51,748	98,926	n/a	85,435	37,915	21,662	13,403	8,554	5,549	3,336	1,851	1,412
5	Draft at AP m	12,201	11,625	11,612	11,731	11,617	11,629	12,202	13,283	15,015	17,810	22,912	37,161	n/a	17,690	3,709	-1,096	-3,690	-5,479	-6,840	-7,509	-7,547	-7,480
6	WL Length m	219,48	218,17	217,35	217,17	217,35	218,17	219,48	219,76	218,43	216,51	212,92	209,94	205,80	190,49	193,63	196,32	198,47	199,83	199,85	196,86	191,83	169,31
7	Beam max extents	22,078	25,901	32,622	32,136	32,622	25,896	22,078	20,548	19,976	18,490	17,042	16,392	16,572	16,843	17,042	18,492	20,906	24,914	26,165	29,768	32,522	32,080
8	Wetted Area m²	14518,	13919,	12711,	11534,	12709,	13918,	14518,	14838,	15024,	15156,	15264,	15370,	15490,	15555,	15588,	15631,	15685,	15669,	15606,	15364,	14890,	14537,
9	Waterpl. Area m²	3331,9	3940,5	5003,2	5747,1	5004,4	3940,8	3331,9	3035,5	2904,7	2811,8	2703,7	2602,7	2564,2	2616,2	2738,8	2887,8	3069,2	3268,4	3425,9	3757,0	4397,9	4903,9
10	Prismatic coeff. (Cp)	0,668	0,670	0,666	0,663	0,666	0,670	0,668	0,668	0,669	0,669	0,673	0,675	0,680	0,731	0,723	0,718	0,715	0,711	0,708	0,715	0,724	0,797
11	Block coeff. (Cb)	0,627	0,608	0,559	0,623	0,559	0,608	0,627	0,610	0,585	0,604	0,645	0,674	0,659	0,662	0,628	0,572	0,514	0,448	0,455	0,445	0,452	0,551
12	LCB from zero pt. (	-0,407	-0,407	-0,410	-0,426	-0,421	-0,415	-0,408	-0,393	-0,375	-0,354	-0,330	-0,303	-0,278	-0,260	-0,255	-0,260	-0,266	-0,269	-0,250	-0,283	-0,299	-0,293
13	LCF from zero pt. (	-17,46	-18,36	-17,64	-11,08	-17,63	-18,35	-17,46	-16,91	-16,06	-14,62	-13,59	-14,00	-14,71	-15,44	-18,11	-21,91	-25,71	-28,11	-27,43	-24,08	-18,80	-11,92
14	Max deck inclinatio	30,053	20,065	10,093	1,2660	10,092	20,065	30,053	40,045	50,037	60,030	70,023	80,013	90,000	99,983	109,96	119,95	129,93	139,90	149,86	159,81	169,68	177,55
15	Trim angle (+ve by	-2,175	-1,761	-1,395	-1,266	-1,392	-1,758	-2,175	-2,719	-3,533	-4,943	-7,884	-16,52	-90,00	-18,02	-9,329	-6,237	-4,692	-3,855	-3,405	-2,981	-2,584	-2,445

Рисунок 5.4.3 – Результати розрахунків критерії остійності

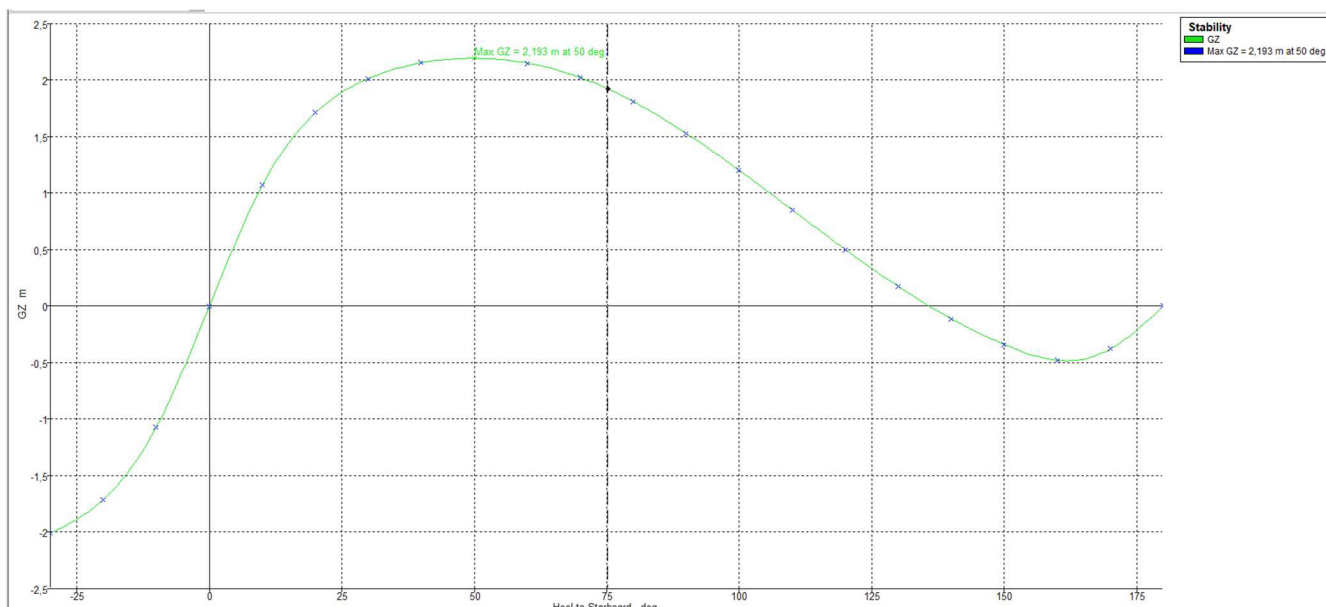


Рисунок 5.4.4 – Остійність при пошкодженні

При моделюванні аварійної остійності із затопленням одного вантажного трюму, судно зберігає запас остійності, що перевищує нормативні вимоги Регістру судноплавства України. Максимальне відновлювальне плече становить

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.05	Арк.
						78
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

2.19 м при куті крену 50° , кут закінчення остійності — 135° . Отже, непотоплюваність і остійність судна у пошкодженному стані забезпечені.

5.5. Розрахунок ходовості балкера.

Ходовість судна — це його здатність рухатися із заданою швидкістю при певній потужності головного двигуна та характеристиках рушія. Основним фактором, що впливає на швидкість і ефективність руху, є сила опору води, яка складається з кількох складових: опору тертя, опору форми, хвильового опору та опору виступаючих частин корпусу.

Унаслідок в'язкості води між поверхнею корпусу судна та прилеглими шарами рідини виникають сили тертя, подолання яких вимагає частини потужності головної енергетичної установки. Сумарна дія цих сил утворює опір тертя R_T . Його величина залежить від швидкості руху, площі змоченої поверхні корпусу та ступеня її шорсткості. На шорсткість впливають якість лакофарбового покриття й обростання корпусу морськими організмами. Щоб уникнути збільшення опору, судно періодично докують для очищення та фарбування підводної частини корпусу. Опір тертя визначають аналітичними або емпіричними методами розрахунку.

Під час обтікання корпусу в'язкою рідиною відбувається перерозподіл гідродинамічного тиску вздовж його довжини. Сумарна дія цих тисків, спрямована проти руху, називається опором форми R_F . Його величина залежить як від швидкості, так і від геометрії обводів судна. При недостатньо обтічній кормовій частині утворюються вихори, які знижують тиск і збільшують загальний опір корпусу.

Хвильовий опір R_X виникає внаслідок утворення системи поверхневих хвиль під час руху судна, що супроводжується чергуванням зон підвищеного й зниженого тиску. Він визначається швидкістю, формою обводів корпусу, а також глибиною та шириною фарватеру.

Опір виступаючих частин $R_{ВЧ}$ залежить від їх геометрії та відносної шорсткості. До таких елементів належать керма, кілі, кронштейни гребних валів тощо.

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.05	Арк.
						79
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

Сумарно опір форми та хвильовий опір об'єднують у залишковий опір, який може бути визначений лише наближено. Для уточнення цього показника проводять експериментальні випробування моделей суден у дослідному басейні, що дозволяє оцінити гідродинамічні властивості корпусу з високою точністю.

Повітряний опір $R_{\text{пов}}$ руху судна можна знайти шляхом продувки надводної частини моделі в аеродинамічній трубці.

Таким чином, повний опір руху судна визначається як сума складових

$$R = R_{\text{ф}} + R_{\text{т}} + R_{\text{х}} + R_{\text{вч}} + R_{\text{пов}}.$$

Цей опір називають буксирувальним, так як він дорівнює зусиллю в тросі, що виникає при буксируванні судна. Потужність, яка необхідна для буксирування судна зі швидкістю v , називається буксирувальною потужністю

$$EPS = \frac{Rv}{102}, \text{ для розрахунку у кВт, або}$$

$$EPS = \frac{Rv}{75}, \text{ для розрахунку у к. с.,}$$

де R – це повний опір, кН; v – це швидкість судна, м/с.

Потужність на фланці головного двигуна більше буксирувальної, так як при її визначенні необхідно враховувати пропульсивний коефіцієнт η ($\eta = \eta_{\text{р}}\eta_{\text{к}}$, де $\eta_{\text{р}}$ – це коефіцієнт корисної дії рушію, а $\eta_{\text{к}}$ – це коефіцієнт впливу корпусу), ККД редуктору- $\eta_{\text{ред}}$, ККД валопроводу - $\eta_{\text{в}}$ (опорних та упорних підшипників) або інших спеціальних передач: $N_e = \frac{EPS}{\eta \eta_{\text{ред}} \eta_{\text{в}}}.$

Варто зазначити, що під час руху на хвилюванні швидкість судна зменшується через додатковий опір, який створюють хвилі. Щоб компенсувати ці втрати і забезпечити досягнення розрахункової експлуатаційної швидкості в умовах хвилювання, на деяких судах передбачають збільшену потужність головного двигуна. Це дозволяє підтримувати стабільну швидкість та ефективність руху навіть за несприятливих морських умов.

5.5.1 Розрахунок ходовості балкеру у модулі Maxsurf Resistance

Для уточнення характеристик ходовості судна використовуємо програмне середовище (Maxsurf Resistance). Завантажуємо 3D-модель судна

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.05	Арк.
						80
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

концептуального проекту. Далі у меню «Analysis» потрібно обрати пункт «Methods», де можна обрати метод розрахунку (рисунок 5.5.1.). Обираємо метод Холтропа.

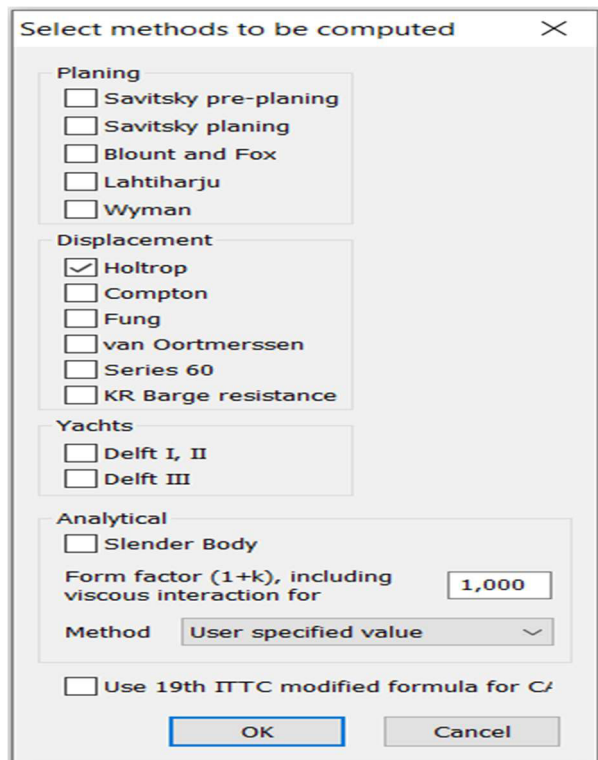


Рис 5.5.1 – «Methods»

	Speed (kn)	Froude No. LWL	Froude No. Vol.	Holtrop Resist. (kN)	Holtrop Power (kW)
1	0,000	0,000	0,000	--	--
2	0,375	0,004	0,010	0,9	0,177
3	0,750	0,008	0,019	3,7	1,419
4	1,125	0,013	0,029	8,6	4,969
5	1,500	0,017	0,038	16,0	12,319
6	1,875	0,021	0,048	26,1	25,192
7	2,250	0,025	0,057	39,3	45,494
8	2,625	0,029	0,067	55,7	75,262
9	3,000	0,034	0,077	75,6	116,604
10	3,375	0,038	0,086	98,9	171,647
11	3,750	0,042	0,096	125,7	242,477
12	4,125	0,046	0,105	156,0	331,101
13	4,500	0,050	0,115	189,8	439,408
14	4,875	0,054	0,124	226,9	569,140
15	5,250	0,059	0,134	267,3	721,879
16	5,625	0,063	0,144	310,7	899,031
17	6,000	0,067	0,153	357,0	1101,832
18	6,375	0,071	0,163	405,9	1331,343
19	6,750	0,075	0,172	457,4	1588,464
20	7,125	0,080	0,182	511,3	1873,946
21	7,500	0,084	0,191	567,2	2188,401
22	7,875	0,088	0,201	625,1	2532,322
23	8,250	0,092	0,211	684,7	2906,097
24	8,625	0,096	0,220	746,0	3310,029
25	9,000	0,101	0,230	808,7	3744,352
26	9,375	0,105	0,239	872,8	4209,252
27	9,750	0,109	0,249	938,0	4704,881
28	10,125	0,113	0,258	1004,3	5231,381
29	10,500	0,117	0,268	1071,7	5788,895
30	10,875	0,122	0,278	1140,0	6377,588
31	11,250	0,126	0,287	1209,1	6997,663
32	11,625	0,130	0,297	1279,1	7649,379
33	12,000	0,134	0,306	1349,8	8333,062
34	12,375	0,138	0,316	1421,4	9049,122
35	12,750	0,142	0,325	1493,8	9798,064
36	13,125	0,147	0,335	1567,0	10580,50
37	13,500	0,151	0,345	1641,1	11397,17
38	13,875	0,155	0,354	1716,0	12248,92
39	14,250	0,159	0,364	1792,0	13136,76
40	14,625	0,163	0,373	1869,0	14061,81
41	15,000	0,168	0,383	1947,1	15025,36

Рис 5.5.2 – Буксирувальний опір при різних швидкостях руху

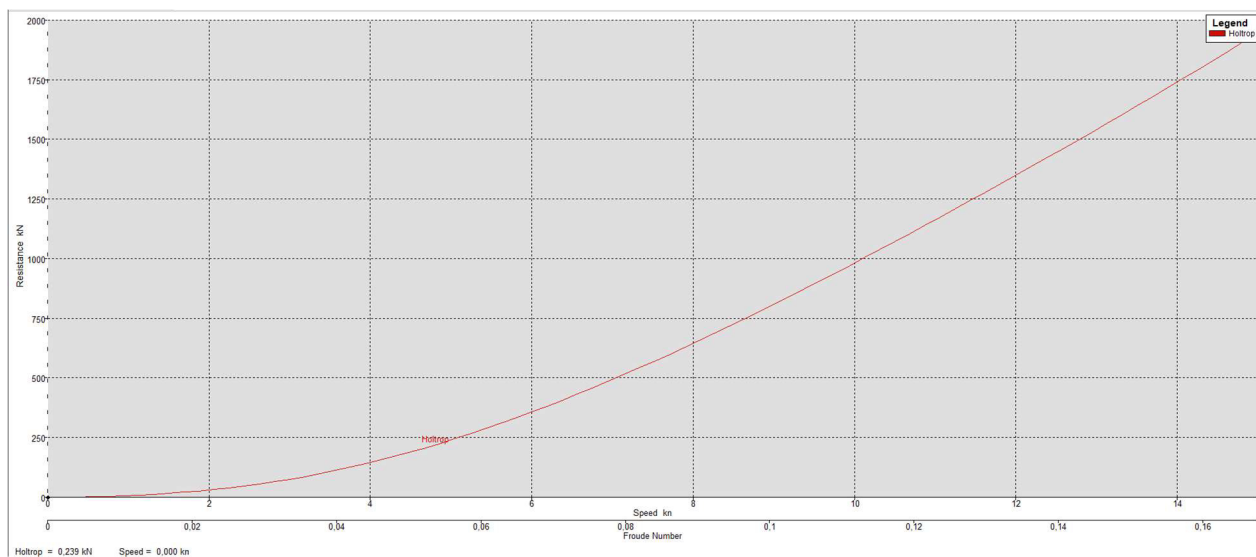


Рис 5.5.3–Буксирувальна потужність балкера при різних швидкостях

Визначення буксирувальної потужності балкера при швидкості 15 вузлів показує, що необхідна потужність головного двигуна балкера дорівнює 15025 кВт.

Виконавши аналіз паспортних даних двигунів провідних дизелебудівних фірм, вибираю двигун «MANB&W» з характеристиками:

Марка	Потужність кВт	Частота обертів	Використання палива г/(кВтч)	Довжина мм	Ширина мм	Висота мм	Маса т
8L60MC	15360	123	171	10583	3228	9300	451

5.6 Підбір гвинта для балкера

Раціональний вибір типу та основних характеристик рушійної установки, а також її узгодження з геометрією корпусу, істотно впливають на ходові та експлуатаційні властивості балкерного судна. З огляду на близькість головних розмірів, водотоннажності та швидкісних характеристик проєктованого судна до судна-прототипа, параметри гребного гвинта в даній роботі прийнято за аналогією з реально експлуатованим балкером відповідного класу. Такий підхід є типовим для стадії попереднього проєктування та дозволяє забезпечити технічно обґрунтовані характеристики рушійної установки без виконання детального індивідуального проєктування гвинта.

Для балкерів даного класу традиційно застосовуються одnogвинтові рушійні установки з горизонтальним розташуванням валолінії та гребними гвинтами фіксованого кроку, що забезпечують високий пропульсивний ККД та надійну роботу в широкому діапазоні експлуатаційних режимів. Як базовий прийнято чотирилопасний гребний гвинт, який є оптимальним компромісом між ефективністю, кавітаційною стійкістю та конструктивною міцністю для балкерних суден середнього дедвейту. Основні геометричні характеристики прийнятого гвинта включають діаметр 8,2 м, номінальний крок 8,5 м, дискове відношення (Expanded BAR) 0,65, нульовий кут скошу лопатей та кут нахилу лопатей 5°. Така комбінація параметрів забезпечує збалансоване поєднання пропульсивної ефективності, конструктивної міцності та прийнятного рівня кавітаційних явищ у характерних режимах експлуатації балкерного судна.

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.05	Арк.
						83
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

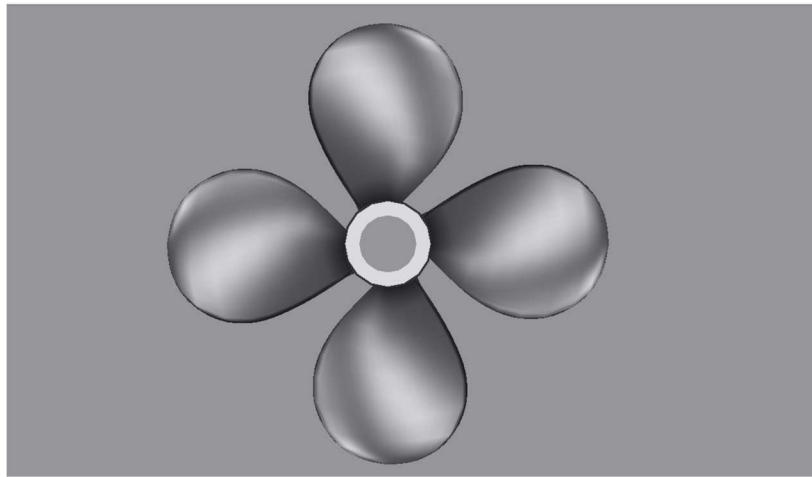


Рис 5.6.1 – 3D модель гвинта

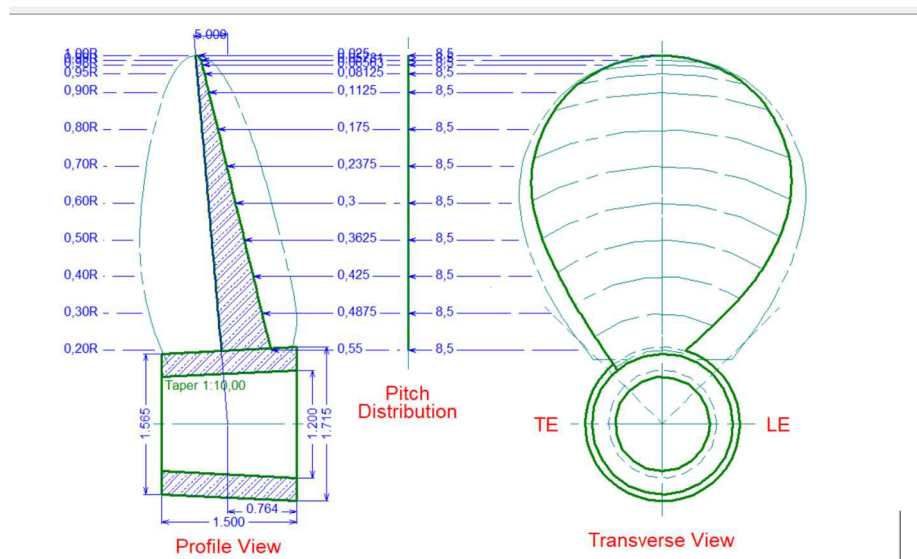


Рис 5.6.2 – Теоретичне креслення гвинта

Застосування гребного гвинта з наведеними характеристиками забезпечує узгоджену роботу рушійної установки з головним двигуном та геометрією кормової частини корпусу, а також відповідає усталеній практиці проєктування й експлуатації балкерних суден аналогічного класу. Прийняті параметри гвинта дозволяють реалізувати задану швидкість ходу при допустимих навантаженнях на рушійну систему та забезпечують стабільну роботу судна в характерних експлуатаційних режимах. [11]

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.05	Арк.
						84
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.06			
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата				
					Розрахунок економії палива	Літ	Аркуш	Аркушів
Студент	Джула Д. В.					у	85	14
Консульт.	Пащенко Ю.М.					НУК імені адм. Макарова		
Керівник	Пащенко Ю.М.							
Зав. каф.	Некрасов В.О.							

6. Розрахунок економії пального.

6.1. Теоретичні відомості щодо використання роторів Флеттнера на балкері.

Сучасні технології вітро-допоміжного руху (Wind-Assisted Propulsion Systems, WAPS) активно застосовуються у світовій практиці як засіб зниження експлуатаційних витрат та рівня викидів CO₂. Одним із найбільш ефективних технічних рішень є ротор Флеттнера, що працює на основі ефекту Магнуса. Під час обертання циліндричної поверхні у потоці повітря навколо ротора формується різниця тисків, яка створює поперечну (підйомну) силу, спрямовану під кутом до вітрового потоку. Поздовжня складова цієї сили використовується як додаткова рушійна тяга, що дозволяє зменшити навантаження на головний двигун при збереженні заданої швидкості судна.

У рамках концептуального проектування балкера для транспортного маршруту Баликпапан (Індонезія) – Шеньчжень (Китай) було прийнято рішення інтегрувати три ротори Флеттнера виробництва Norsepower. Вибір обумовлений сприятливими умовами вітру на більшій частині маршруту, а також можливістю ефективного використання WAPS у режимі підтримання сталої швидкості (SPEED-KEEP). Роторні установки розташовано на палубі між люками №2–3, №3–4 і №5–6, при цьому ротори виконані у складаному варіанті (lay-down) для забезпечення безпеки вантажних операцій та проходження під мостами.

Прийнята конфігурація роторів включає елементи стандартного промислового типоряду Norsepower, які забезпечують необхідний рівень тяги при помірному енергоспоживанні приводу. Геометричні та технічні характеристики використовуваних роторів наведені в таблиці 6.1. [27]

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.06	Арк.
						86
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

Параметр	Значення
Висота ротора, Н	28 м
Діаметр ротора, D	4 м
Проекційна площа, A	112 м²
Матеріал	Композит
Діапазон швидкості обертання	0–225 об/хв
Номінальна електропотужність	100 кВт
Напруга живлення	380–690 В
Частота струму	50/60 Гц
Типова маса фундаменту	15 т
Загальна маса установки (без фундаменту)	36 т
Максимальна неперервна тягова сила	205 кН
Робоча температура	–20...+50 °С
Максимальна робоча швидкість вітру	35 м/с
Швидкість вітру на виживання	70 м/с

Таблиця 6.1 — Технічні характеристики ротора Norsepower (28м× 4 м)

Прийнята конфігурація забезпечує оптимальне співвідношення між приростом тяги та впливом на остійність судна. Через циліндричну форму та компактні габарити роторів їх додаткова парусність у прямому курсі є незначною, а креновий момент від роботи роторів у номінальних режимах залишається малим у порівнянні з моментами від дії вітру на корпус, що обґрунтовує можливість коректного використання WAPS у стандартному розрахунку критеріїв остійності.

Для наочності інтеграції роторних установок у конструкцію судна доцільно показати їх фактичне розташування на палубі. На кресленні загального розташування (рис. 6.1.1) добре видно прив'язку кожного ротора до шпангоутів, а також взаємне розташування відносно вантажних люків та надбудови. Це дозволяє оцінити вплив конфігурації WAPS на компоновку судна та підтверджує можливість їх безпечного монтажу.

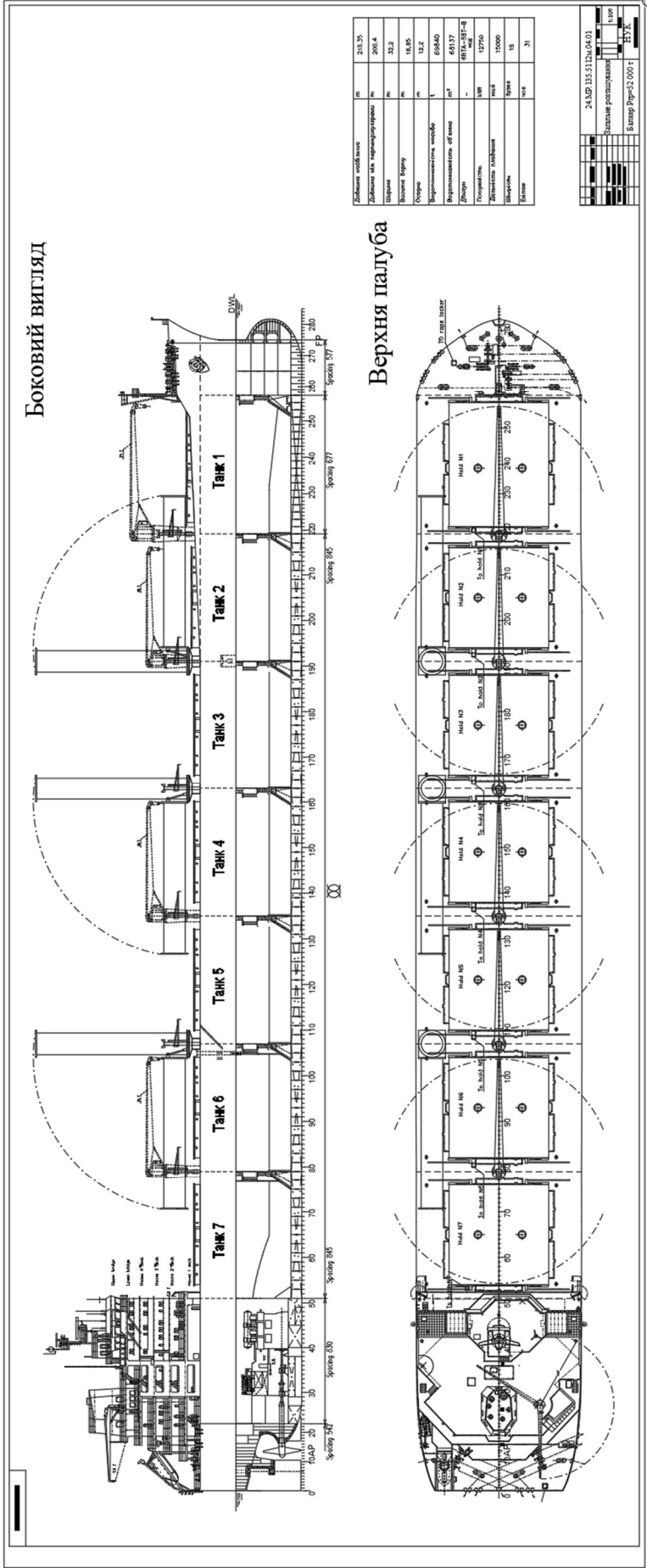


Рис. 6.1.1 – Креслення загального розташування.

6.2 Оцінювання економії пального на переході з урахуванням роботи роторів Флеттнера.

У цьому розділі оцінювання економії пального виконується на основі порівняння роботи судна на заданому маршруті в двох режимах: без використання роторів та з використанням трьох роторів Флеттнера. Оскільки метеорологічні умови змінюються уздовж переходу, маршрут поділено на низку контрольних точок (рис. 6.2.1), координату кожної з яких можна побачити у таблиці 6.2. У кожній точці враховуються напрям і швидкість вітру на момент проходження. Для даного проєкту аналіз виконується для умов квітня, як місяця з типовими для цього регіону вітровими характеристиками.

У кожній контрольній точці визначається видима швидкість вітру, що діє на судно, та відповідне зниження потужності головного двигуна при роботі роторів у режимі SPEED-KEEP, тобто з підтриманням сталої швидкості ходу 15 вузлів. Після цього порівнюються витрати пального у двох сценаріях, і на основі інтегрування результатів уздовж всього маршруту визначається сумарна економія. [16]

Оцінювання економії пального виконується шляхом порівняння двох сценаріїв руху судна:

- **Базовий сценарій (без роторів)** – потужність на валу визначається за розрахованою залежністю «потужність–швидкість», отриманою за методикою Холтропа та перевіреною в програмі PropExpert. Витрата палива визначається за кривою питомої витрати палива (SFOC) головного двигуна.
- **Сценарій із роторами (SPEED-KEEP)** – для кожної контрольної точки маршруту визначається вимпельна швидкість вітру, генерована роторами тяга та відповідна «еквівалентна» потужність, що заміщає частину потужності двигуна. Після цього уточнюється навантаження ГД, визначається нова витрата палива та підсумовується економія.

Таким чином, економічний ефект від застосування роторів Флеттнера розглядається як різниця у сумарній витраті пального між двома сценаріями при ідентичній швидкості проходження маршруту. Такий підхід є найбільш

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.06	Арк.
						89
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

поширеним у сучасних дослідженнях та відповідає практиці оцінки ефективності технологій Wind-Assisted Propulsion.

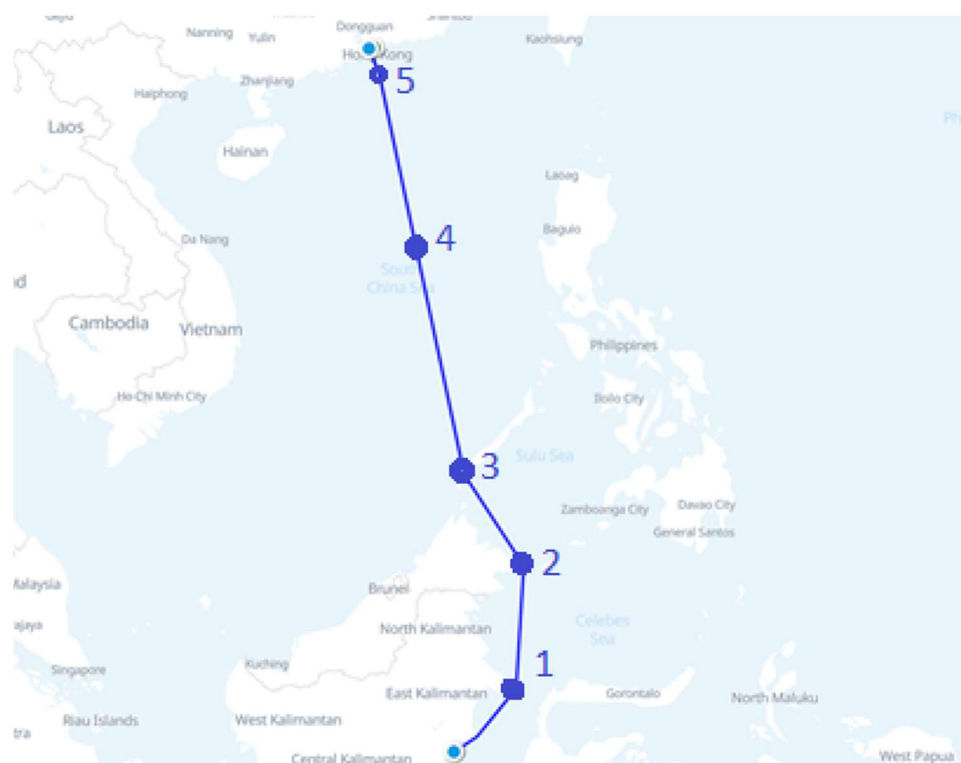


Рис. 6.2.1 – Контрольні точки на маршруті

№ точки	Позначення	Широта, ° (N+/S–)	Довгота, °E	Примітка
0	Балікпапан (Start)	–1.2735	116.8052	Вихід з порту Балікпапан
1	WP1	0.9413	119.0579	Північна частина Макасарської протоки
2	WP2	5.0336	119.6161	Район південно-західніше від о. Мінданао
3	WP3	8.1960	117.0643	Сулуське/південна частина Південно-Китайського моря
4	WP4	15.6375	114.9942	Центральна частина Південно-Китайського моря
5	WP5	21.9384	113.5863	Підхід до дельти Жемчужної ріки
6	Шеньчжень (End)	22.4682	113.9167	Підхід до порту Шеньчжень/Гонконг

Таблиця 6.2.2 — Координати контрольних точок.

Для зворотного рейсу просто йдемо у зворотному порядку: 6 → 0.

Сумарна довжина маршруту в одному напрямку становить приблизно 1567 морських миль. Оскільки оцінювання паливної ефективності виконується для повного кругового рейсу (туди й назад), загальна довжина маршруту складає близько 3134 морських миль, що й приймається для подальших розрахунків.

6.3 Розрахунок витрат палива для базового сценарію (без роторних вітрил)

Для визначення витрат палива на заданому маршруті спочатку виконується розрахунок необхідної потужності для підтримання сталої швидкості ходу 15 вузлів у спокійній воді. Для цього використовується раніше побудована розрахункова залежність опору та потужності за методом Холтропа.

За результатами розрахунку ходовості (рис 5.5.2) для швидкості $V=15$ вуз. отримано:

- Опір корпусу на воді:

$$R_H = 1947,1 \text{ kN}$$

- Ефективна потужність на гвинті

$$P_E = 15025,36 \text{ kW}$$

Ця потужність забезпечується головним двигуном MAN B&W 8L60MC, номінальна потужність якого $P_{MCR} = 15360 \text{ kW}$ при $n = 123$ об/хв. Тобто при швидкості 15 вузлів двигун працює з коефіцієнтом завантаження

$$x = \frac{P_E}{P_{MCR}} = \frac{15025}{15360} = 0,98$$

тобто близько 98 % від номінальної потужності – режим близький до повного ходу, що є типовим для розрахункової швидкості.

Для дизельного ДВЗ виробник задає питому витрату палива – SFOC (Specific Fuel Oil Consumption), г/(кВт·год). Вона показує, скільки грам палива спалюється для вироблення 1 кВт·год корисної потужності. Для двигуна MAN B&W 8L60MC приймаємо:

$$SFOC = 171 \frac{\text{г}}{\text{кВтгод}} = 0,171 \frac{\text{кг}}{\text{кВтгод}}$$

Для кожного сегмента маршруту розраховується миттєва витрата палива — тобто кількість пального, що споживається двигуном за годину роботи на певній

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.06	Арк.
						91
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

потужності, яка відповідає необхідній швидкості руху судна на конкретній ділянці. Отримані значення помножуються на тривалість проходження кожного сегмента, що дозволяє отримати сумарну витрату палива по всьому маршруту та забезпечує коректне порівняння сценаріїв із застосуванням і без застосування роторних вітрил. [17]

Миттєва витрата палива:

$$m_f = P_E * SFOC$$

$$m_f = 15025,36 * 0,171 = 2569 \text{ кг/год} = 2,57 \text{ т/год}$$

Отже, при сталому русі 15 вузлів без використання роторов судно спалює приблизно 2,57 т палива за годину.

Час проходження одного рейсу:

$$t = \frac{L}{V} = \frac{1567}{15} = 104,5 \text{ год}$$

для кругового рейсу:

$$t_{round} = 2t = 104,5 * 2 = 209 \text{ год}$$

Тоді загальна маса пального, необхідна для кругового рейсу в базовому сценарії, дорівнює:

$$M_f = m_f * t_{round} = 2,57 * 209 = 537 \text{ т}$$

Таким чином, при швидкості 15 вузлів та роботі головного двигуна на 98 % потужності, орієнтовна витрата палива на круговий рейс за маршрутом Баликпапан – Південний Китай – Баликпапан становить близько 537 т. Це значення далі використовуватиметься як базовий рівень для порівняння з варіантом, у якому частина тяги забезпечується роторними вітрилами. [17]

6.4 Оцінка економії палива від застосування роторних вітрил

У цьому підрозділі виконується оцінка економії палива для балкера дедвейтом близько 52 000 т при використанні трьох роторних вітрил типу Norsepower висотою 28 м і діаметром 4 м у режимі SPEED-KEEP, тобто за умови збереження сталої швидкості $V=15$ вуз на всьому маршруті.

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.06	Арк.
						92
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

Параметри роторних вітрил і їх тяга

На судні встановлюється три роторні вітрила типу Flettner розмірністю:

- діаметр $D=4$ м;
- висота $H=28$ м;
- кількість роторових вітрил $n=3$.

Ефективна бічна аеродинамічна сила (підйомна сила), яку створює один ротор при робочих режимах обертання та характерних для маршруту вітрових умовах (квітень, Баликпапан – Південний Китай) при швидкості вітру $10 \dots 14$ м/с,, за узагальненими даними виробників систем роторових вітрил приймається на рівні: [27]

$$T_1 = 130 \text{ kH}$$

де T_1 – середня повна тяга одного ротора (аеродинамічна сила, спрямована перпендикулярно до видимого вітру). Для трьох роторів сумарна сила:

$$T_{\Sigma} = n * T_1 = 390 \text{ kH}$$

Це значення є максимальною аеродинамічною тягою, яка може бути реалізована при сприятливому відносному напрямку вітру (галфінд, бакштаг).

Врахування напрямку вітру на сегментах маршруту.

Фактичний корисний ефект від роботи роторових вітрил залежить не лише від їх геометрії та швидкості обертання, а й від відносного напрямку вітру щодо курсу судна на кожній ділянці маршруту.

Маршрут Баликпапан – Південний Китай – Баликпапан у квітні проходить через зону, де переважають помірні східні та південно-східні вітри. При цьому:

- на частині ділянок прямого рейсу (Баликпапан → Китай) роторні вітрила працюють у режимі галфінду / бакштагу, забезпечуючи значну корисну складову тяги вздовж курсу;
- на зворотному шляху (Китай → Баликпапан) відносний кут вітру гірший (частково бейдевінд або близький до фордевінду), і поздовжня складова тяги ротора зменшується.

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.06	Арк.
						93
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

Щоб це врахувати, вводиться коефіцієнт спрямованості для кожного сегмента маршруту:

- коли вектор роторової сили майже повністю проєктується на напрямок руху (оптимальний курс відносно вітру):

$$k_{dir,i} \approx 1$$

- коли ротор дає майже тільки поперечну силу (несприятливий кут вітру):

$$k_{dir,i} \approx 0$$

Тоді корисна поздовжня (дотична до курсу) складова тяги на i -му сегменті:

$$T_{use,i} = T_{\Sigma} * k_{dir,i}$$

Для врахування реальної орієнтації судна відносно вітру на різних ділянках маршруту використано усереднений коефіцієнт спрямованості $k_{dir,avg}$. Він визначає частку повної тяги роторів, що діє уздовж діаметральної площини судна. За аналізом середніх напрямків і швидкостей вітру у квітні на маршруті Балтікпапан – Шеньчжень – Балтікпапан встановлено, що судно у напрямку «туди» отримує середній відносний кут вітру $60\text{--}110^\circ$, а у зворотному напрямку — $120\text{--}150^\circ$, що дає середнє значення:

$$k_{dir,avg} \approx 0,6$$

Таке значення відповідає практиці попередніх досліджень WAPS та рекомендаціям Norsepower для концептуальних розрахунків. [27]

Тоді середня поздовжня тяга роторових вітрил:

$$T_{use,avg} = T_{\Sigma} * k_{dir,avg} \approx 390 * 0,6 \approx 234 \text{ кН}$$

Перехід від тяги ротора до еквівалентної потужності.

Зв'язок фізично дуже простий: будь-яка тяга, що діє уздовж курсу судна, при заданій швидкості відповідає певній потужності.

Базове співвідношення:

$$P = \frac{T * V}{\eta_{пр}}$$

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.06	Арк.
						94
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

Де:

- P - потужність, яку необхідно розвинути для компенсації сили опору T при швидкості V ;
- T – сила (тут – корисна поздовжня тяга роторових вітрил $T_{use,avg}$);
- V – швидкість судна (15 вузлів);
- $\eta_{пр}$ – пропульсивний ККД системи «двигун – валопровід – гвинт».

Якщо частину загального тягового зусилля забезпечують ротори, то пропорційно зменшується частка тяги, яку повинен створювати гвинт, а значить, і потрібна потужність головного двигуна.

Відносна частка:

$$\psi = \frac{T_{use,avg}}{R_H} = \frac{234}{1947,1} \approx 0,12$$

тобто ротори потенційно можуть забезпечити до 12 % від сумарного тягового зусилля уздовж курсу.

Однак у практиці частину цієї теоретичної вигоди з'їдають:

- нерівномірність вітрових умов по часу;
- обмеження за безпекою (ротори можуть відключатися при штормі, маневруванні тощо);
- відмінності фактичного режиму роботи гвинта від розрахункового;
- втрати в системах керування та допоміжних споживачах.

Щоб узагальнено врахувати ці ефекти, вводимо ефективний коефіцієнт використання роторової тяги k_{eff} , який переводить відносну частку ψ у реальне зменшення потужності головного двигуна:

$$n_{rot} = \psi * k_{eff}$$

Припускаючи для концептуального рівня проектування, що $k_{eff} \approx 0,5$, отримуємо:

$$n_{rot} = 0,12 * 0,5 \approx 0,06$$

тобто очікуване реальне зменшення необхідної потужності головного двигуна становить близько 6 %. Детальна спільна оптимізація «гвинт + ротори» у цій роботі не виконується. Вважається, що геометрія гвинта підібрана для ходу

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.06	Арк.
						95
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

15 вузлів у базовому сценарії, а при роботі роторних вітрил змінений режим залишається в допустимій області характеристики гвинта; вплив зміни режиму враховується узагальнено через коефіцієнт k_{eff} .

Потужність і витрата палива в сценарії SPEED-KEEP

З урахуванням того, що ротори «перекривають» близько 6 % необхідної потужності, нова розрахункова потужність головного двигуна при тій самій швидкості 15 вузлів становитиме:

$$P_{15,rot} = P_{15} * (1 - n_{rot})$$

Де:

- P_{15} – потужність у базовому сценарії без роторових вітрил;
- n_{rot} – відносне зменшення потужності за рахунок роторової тяги;
- $P_{15,rot}$ – нова необхідна потужність двигуна при швидкості 15 вузлів із урахуванням роторового підхоплення

$$P_{15,rot} = 15025,36 * (1 - 0,06) \approx 15025,36 \cdot 0,94 \approx 14124 \text{ кВт.}$$

Миттєва витрата палива в сценарії SPEED-KEEP:

$$m_{f,1} = P_{15,rot} * SFOC$$

$$m_{f,1} = 14124 * 0,171 = 2415 \text{ кг/год} = 2,42 \text{ т/год}$$

Оскільки довжина маршруту та швидкість судна залишаються тими самими, час кругового рейсу не змінюється:

$$t_{round} = 209 \text{ год}$$

Отже, загальна витрата палива з роторами:

$$M_{f,1} = m_{f,1} * t_{round} = 2,42 * 209 = 505 \text{ т}$$

Економія пального за рейс:

- без роторових вітрил:

$$M_f = 537 \text{ т}$$

- з трьома роторними вітрилами (SPEED-KEEP):

$$M_{f,1} = 505 \text{ т}$$

- одержуємо економію палива за один круговий рейс:

$$\Delta M_f = M_f - M_{f,1} = 537 - 505 = 32 \text{ т}$$

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.06	Арк.
						96
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

- відносна економія:

$$\frac{\Delta M_f}{M_f} = \frac{32}{537} \approx 0,06 \text{ тобто близько } 6 \, \%.$$

Таким чином, з урахуванням реальних характеристик корпусу, двигуна й маршруту руху проєктованого балкера, а також впливу напрямку вітру на різних ділянках переходу, очікувана економія палива від використання трьох роторних вітрил розміром 4×28 м у сценарії SPEED-KEEP оцінюється на рівні приблизно 6 % по круговому рейсу. Це значення добре узгоджується з діапазоном економії, який декларують виробники роторових вітрил для аналогічних суден.

6.5 Грошова економія на паливі

В рамках оптимізаційної моделі, застосованої для проєктованого балкера, річний цикл експлуатації судна враховував типовий графік роботи на міжнародних лініях. З урахуванням тривалості рейсу, часу на вантажно-розвантажувальні операції, переходи в баласті та технічні простої, середньорічна інтенсивність експлуатації становить близько 30 кругових рейсів. Це значення відповідає практиці комерційної роботи балкерів класу Supramax у регіоні Південно-Східної Азії і використовується як базовий параметр для подальшого розрахунку паливної ефективності. Тоді річна економія палива:

$$\Delta M_{f,year} = 32 \text{ т/рейс} \cdot 30 \text{ рейсів} \approx 960 \text{ т/рік}.$$

Для регіону Сінгапур / Південно-Китайське море в 2025 р. ціни на VLSFO коливаються приблизно в діапазоні 450–540 \$/т, середні значення в районі ~500 \$/т за даними Ship & Bunker, MABUX, OPIS.

Приймаємо для оцінки усереднену ціну:

$$p_f \approx 500 \text{ $/т}.$$

Тоді річна економія грошей від роторових вітрил:

$$\Delta C_{year} = \Delta M_{f,year} \cdot p_f = 960 \text{ т/рік} \cdot 500 \text{ $/т} \approx 480000 \text{ $/рік}.$$

Оцінка вартості роторних вітрил і строку їх окупності

Для проєктованого балкера прийнято конфігурацію з трьома роторовими вітрилами Norsepower висотою 28 м та діаметром 4 м кожне. Орієнтовна вартість одного ротора такого типорозміру за оцінками виробника становить 1,3–1,6 млн

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.06	Арк.
						97
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

євро, тому загальна вартість системи разом з монтажем, електронікою та інтеграцією складає приблизно 4,2–4,8 млн євро.

Виконані розрахунки показали, що застосування роторних вітрил забезпечує середньорічну економію пального на рівні $\approx 6\%$ від загального споживання судна на маршруті Баликпапан – Шеньчжень – Баликпапан. За умови середньої ціни пального 500 \$/т та виконання близько 30 кругових рейсів на рік, очікуваний економічний ефект становить приблизно 1,4–1,7 млн \$ на рік.

Враховуючи ці показники, орієнтовний строк окупності системи роторних вітрил становить 3–4 роки, що відповідає сучасним критеріям економічної ефективності енергозберігальних технологій та виправдовує їх інтеграцію на балкер.

					24. МР.135. 6112м.04.ПЗ.06	Арк.
						98
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновок

У дипломній роботі виконано проектування сучасного балкера з урахуванням вимог енергоефективності та тенденцій розвитку світового флоту. На основі аналізу маршрутів і експлуатаційних умов сформовано вихідні дані та проведено оптимізацію головних розмірів судна засобами варіантного проектування, що дозволило отримати раціональні пропорції корпусу та забезпечити необхідну вантажомісткість при дотриманні портових та класифікаційних обмежень.

Проведено розрахунки гідростатичних характеристик, елементів остійності, обводів корпусу, а також виконано детальний аналіз рушійно-енергетичної установки. Особливу увагу приділено порівнянню базового сценарію експлуатації та сценарію із застосуванням роторних вітрил як системи вітропідтримки. Розрахунок тяги, коефіцієнтів ефективності та добових витрат палива показав потенційну економію палива та зниження викидів, що підтверджує доцільність інтеграції такого обладнання на балкері середнього дедвейту.

Отримані результати свідчать про ефективність застосованої методики оптимізації та комплексного підходу до вибору конструктивних і експлуатаційних параметрів. Розроблений проєкт може бути використаний як основа для подальшого вдосконалення судна, включно з уточненням обводів, вибором обладнання та деталізацією економічної моделі експлуатації. Робота підтверджує можливість досягнення суттєвого зниження енерговитрат та підвищення екологічності балкерного флоту.

					24. МР.135. 6112м.04.П300	Арк.
						99
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел:

Books & Monographs

- [1] Babich, V. V. (2014). **Ekonomika proektuvannia i zhyttievyy tsykl sudna** [Economics of ship design and life cycle]. Mykolaiv: NUK.
- [2] Cullinane, K. (2011). **Shipping economics**. London: Routledge.
- [3] Cullinane, K., & Haralambides, H. (2015). **Global trends in maritime economics**. London: Palgrave Macmillan.
- [4] Eyres, D. J., & Bruce, G. J. (2012). **Ship construction** (7th ed.). Amsterdam: Butterworth-Heinemann.
- [5] Gavrilenko, M. M. (2006). **Matematychni modeliuvannia protsesiv ekspluatatsii suden** [Mathematical modelling of ship operation processes]. Mykolaiv: NUK.
- [6] Gilpin, G. (2022). **Smart green shipping**. Glasgow: SGS Publishing.
- [7] Ivanov, V. O. (2007). **Osnovy teorii nadiinosti sudnovykh system** [Reliability theory of ship systems]. Mykolaiv: NUK.
- [8] Ivanov, V. O., & Chernov, A. H. (2008). **Teoriia korablia. Chastyna II. Modeli hidrodynamichnykh i morekhidnykh kharakterystyk** [Ship theory. Part II]. Mykolaiv: NUK.
- [9] Ivanov, V. O., & Chernov, A. H. (2009). **Metody optymizatsii sudnobudivnykh system** [Optimization methods for shipbuilding systems]. Mykolaiv: NUK.
- [10] Kavussanos, M. G., & Visvikis, I. D. (2009). **The international handbook of shipping finance**. London: Palgrave Macmillan.
- [11] Oosterveld, M. W. C., & van Oossanen, P. (1975). **Further computer-analyzed data of the Wageningen B-screw series**. Wageningen: Netherlands Ship Model Basin (NSMB).
- [12] Marine Propellers and Propulsion. (2019). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [13] Nadtochii, V. M. (2018). **Avtomatyzovani systemy upravlinnia morskyy ob'ektamy** [Automatic control systems of marine objects]. Mykolaiv: NUK.

					24. МР.135. 6112М.04.П300	Арк.
						100
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

[14] Nekrasov, V. O. (2015). **Teoriia proektuvannia suden: Osnovy ta pryklady** [Ship design theory]. Mykolaiv: NUK.

[15] Nekrasov, V. A. (2017). **Otsenivanie stoimosti i srokov postroiki korablei i sudov** [Cost and schedule estimation of ship construction]. Saint Petersburg: SPbGPU.

[16] Rodrigue, J.-P. (2020). **The geography of transport systems** (5th ed.). New York: Routledge.

[17] Rudneko, A. I. (2010). **Modeliuvannia tekhnichnykh i navihatsiinykh vlastyvostei morskyykh suden** [Modelling of ship technical & navigation properties]. Mykolaiv: NUK.

[18] Rudneko, A. I. (2011). **Optymizatsiia ekspluatatsiinykh kharakterystyk morskyykh transportnykh suden** [Optimization of operational characteristics of marine transport vessels]. Mykolaiv: NUK.

[19] Shapovalov, V. S. (2009). **Teoriia ekspluatatsii suden** [Ship operation theory]. Mykolaiv: NUK.

[20] Shapovalov, V. S. (2013). **Imovirnisni metody otsinky tekhnichnoho stanu suden** [Probabilistic methods of ship technical condition analysis]. Mykolaiv: NUK.

[21] Stopford, M. (2009). **Maritime economics** (3rd ed.). London: Routledge.

[22] Trophymenko, O. I. (2002). **Osnovy systemnoho analizu sudnovykh system** [Systems analysis of ship technical systems]. Mykolaiv: NUK.

[23] Trophymenko, O. I., & Ivanov, V. O. (2004). **Systemne modeliuvannia zhyttievoho tsykladu transportnoho sudna** [System modelling of the ship life cycle]. Mykolaiv: NUK.

[24] Trophymenko, O. I., & Ivanov, V. O. (2005). **Systemnyi pidkhid do otsinky nadiinosti morskyykh transportnykh system** [System approach to reliability evaluation]. Mykolaiv: NUK.

Technical Guides & Methodological Sources

[25] DNV GL. (2023). **Alternative Fuels Insight**. Oslo: DNV.

					24. MP.135. 6112M.04.П300	Арк.
						101
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		

[26] HydroComp Inc. (2023). **HydroComp PropExpert User Guide**. Durham, NH, USA.

[27] Norsepower Ltd. (2023). **Norsepower Rotor Sail Solution: Product brochure**.

[28] RINA. (2009). **Design and operation of bulk carriers**. London: RINA.

[29] Wind-Assisted Propulsion Systems. (2023). **GHG compliance guide**. London: IWSA.

Університетські методички

[30] NUK. (2010). **Metodychni vказivky do dyplomnoho proektuvannia** [Diploma project guidelines]. Mykolaiv: NUK.

[31] NUK. (2012). **Metodychni vказivky z kursovoho proektu “Teoriia korablia”** [Ship theory course guidelines]. Mykolaiv: NUK.

Online Sources

[32] SeaRates. (2025). **Distance & transit time calculator**.

<https://www.searates.com/>

					24. МР.135. 6112м.04.П300	Арк.
						102
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата		