

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Херсонський навчально-науковий інститут
Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова

Кафедра Суднобудування та ремонту суден

«Допущений до захисту»
Завідувач кафедри



О.В. Щедролоєв

«19» грудня 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

на тему: **Проектування пасажирського малого судна з гібридною
пропульсивною установкою**

Виконав: студент 6112м групи



Бойчук М.О.

Керівник роботи:
д.т.н., професор



Щедролоєв О.В.

Херсон – 2025 р.

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХЕРСОНСЬКИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА**

Кафедра Суднобудування та ремонту суден

Спеціальність 135 «Суднобудування»

Освітня програма «Суднокорпусобудування»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми



О.В. Щедролюсєв

«17» жовтня 2025 року

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

Студенту

Бойчук Михайло Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Проектування пасажирського малого судна з гібридною пропульсивною установкою

Керівник роботи: д.т.н, професор, Щедролюсєв Олександр Вікторович

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Затверджені наказом по ХННІ НУК № **20** від «**17**» **жовтня 2025 року**

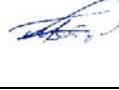
2. Термін подання роботи: 05.12.2025 р.

3. Вихідні дані по роботі: рід вантажу – пасажир; масова пасажиромісткість – 60 чоловік; район плавання – В2; клас судна за РСУ: К(Е) + В2 пасажирське судно

4. Перелік питань, що належить до розробки (найменування розділів): визначення водотоннажності та головних розмірювань; розрахунок елементів теоретичного креслення; розрахунок остійності на великих кутах крену; набір корпусу за Правилами Регістру; розрахунок повздовжньої міцності судна; розрахунок періодів хитавиці та ходовості судна; стисла специфікація за корпусною та механічною частинами; дослідження використання гібридних установок на судні.

5. Перелік презентаційних матеріалів: теоретичне креслення; криві елементів теоретичного креслення; діаграма статичної остійності; конструктивний мідель-шпангоут; загальне розташування; демонстраційна таблиця.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата			
		завдання видав		завдання прийняв	
1 – 6	ст. викладач Соценко В.В.		17.10.2025		17.10.2025
7 – 9	д.т.н, професор Щедролосєв О.В.		17.10.2025		17.10.2025

7. Дата видачі завдання 17.10.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Визначення водотоннажності та головних розмірювань	22.09.2025	
2	Розрахунок теоретичного креслення та розрахунок кривих теоретичного креслення	29.09.2025	
3	Розрахунок остійності на великих кутах крену	06.10.2025	
4	Розрахунок елементів теоретичного креслення	13.10.2025	
5	Набір корпусу за Правилами Регістру	20.10.2025	
6	Розрахунок параметрів хитавиці та ходовості судна	03.11.2025	
7	Стисла специфікація за корпусною та механічною частиною	17.11.2025	
8	Дослідження використання гібридних установок на судні	24.11.2025	
9	Економічне обґрунтування спроектованого судна	01.12.2025	
10	Оформлення пояснювальної записки та презентації магістерської роботи	05.12.2025	

Студент

М.О. Бойчук

Керівник роботи

О.В. Щедролосєв

ЗМІСТ

Анотація.....	5
Вступ.....	9
1. Визначення водотоннажності та головних розмірювань.....	12
2. Розрахунок елементів теоретичного креслення.....	18
3. Розрахунок остійності судна на великих кутах крену.....	25
4. Набір корпусу за Правилами Регістру.....	30
5. Розрахунок періодів хитавиці та ходовості.....	44
6. Стисла специфікація судна за корпусною та механічною частинами ...	48
7. Дослідження використання гібридних установок на судні.....	51
8. Економічне обґрунтування проекту. Розрахунок побудовної вартості судна.....	58
Висновки.....	67
Список використаних джерел і літератури	68

АНОТАЦІЯ

У роботі досліджується процес проектування пасажирського малого судна, призначеного для експлуатації на внутрішніх водних шляхах України. **Актуальність даної теми** зумовлена необхідністю оновлення флоту внутрішнього водного транспорту, підвищення енергоефективності, екологічності та комфорту перевезень пасажирів на річках, водосховищах і прибережних зонах.

Метою роботи є розроблення проекту сучасного пасажирського малого судна з урахуванням специфічних умов експлуатації на внутрішніх водоймах України, вимог безпеки, остійності та конструктивної надійності корпусу. Проект передбачає створення судна з малою осадкою, низьким рівнем шуму та викидів, а також економічною енергетичною установкою.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- виконати розрахунки водотоннажності та головних розмірів судна;
- побудувати теоретичне креслення та криві елементів плавучості;
- розрахувати остійність і непотоплюваність судна відповідно до вимог Регістру судноплавства України;
- розробити загальне розташування судна з урахуванням комфортного розміщення пасажирів і екіпажу;
- виконати конструктивний набір корпусу із застосуванням легких матеріалів (алюмінієвих сплавів або композиційних);
- обрати оптимальний тип рушійної установки (дизельна, гібридна або електрична);
- розрахувати ходові якості судна та періоди хитаючи;
- скласти стислу специфікацію судна за корпусною та механічною частинами;
- провести економічне обґрунтування проекту та визначити побудівельну вартість.

Об'єктом дослідження є малі пасажирські судна як клас річкових транспортних засобів для перевезення пасажирів у внутрішніх водоймах, оснащених гібридними пропульсивними системами.

Предметом дослідження є проект пасажирського малого судна внутрішнього плавання, включаючи його технічні особливості конструкції, остійності та енергетичної установки з урахуванням нормативних вимог Регістру судноплавства України.

Апробація результатів дослідження. Основні положення та результати роботи були представлені у доповіді на XX студентській науково-технічній конференції «Інноваційні технології в суднобудуванні та судноремонті» (12 грудня 2025 р., ХННІ НУК).

Практична значущість кваліфікаційної роботи. Результати магістерської роботи можуть бути використані при модернізації внутрішнього водного флоту України та у навчальному процесі підготовки суднобудівних інженерів.

Ключові слова: внутрішні водойма, гібридна пропульсивна установка, пасажирське мале судно, Правила Регістру, проектування

ANNOTATION

The work investigates the process of designing a small passenger vessel intended for operation on the inland waterways of Ukraine. The relevance of this topic is due to the need to update the fleet of inland water transport, increase energy efficiency, environmental friendliness and comfort of passenger transportation on rivers, reservoirs and coastal areas.

The purpose of the work is to develop a project for a modern small passenger vessel taking into account the specific operating conditions on the inland waters of Ukraine, safety requirements, stability and structural reliability of the hull. The project involves the creation of a vessel with a small draft, low noise and emissions, as well as an economical power plant.

To achieve the set goal, it is necessary to solve the following tasks:

- perform calculations of the displacement and main dimensions of the vessel;
- build a theoretical drawing and curves of buoyancy elements;
- calculate the stability and unsinkability of the vessel in accordance with the requirements of the Register of Shipping of Ukraine;
- develop the general layout of the vessel, taking into account the comfortable accommodation of passengers and crew;
- perform a structural set of the hull using lightweight materials (aluminum alloys or composite);
- choose the optimal type of propulsion system (diesel, hybrid or electric);
- calculate the ship's running qualities and rocking periods;
- draw up a brief specification of the vessel for hull and mechanical parts;
- conduct an economic justification of the project and determine the construction cost.

The object of the study is small passenger vessels as a class of river vehicles for transporting passengers in inland waters, equipped with hybrid propulsion systems.

The subject of the study is the design of a small passenger inland navigation vessel, including its technical features of design, stability and power plant, taking into account the regulatory requirements of the Register of Shipping of Ukraine.

Approbation of the research results. The main provisions and results of the work were presented in a report at the XX student scientific and technical conference "Innovative technologies in shipbuilding and ship repair" (December 12, 2025, KhNNI NUK).

Practical significance of the qualification work. The results of the master's thesis can be used in the modernization of the inland water fleet of Ukraine and in the educational process of training shipbuilding engineers.

Keywords: inland waterways, hybrid propulsion system, small passenger vessel, Register Rules, design.

ВСТУП

Розвиток сучасного суднобудування тісно пов'язаний із підвищенням енергоефективності, екологічності та економічності морського і річкового транспорту. У зв'язку зі зростанням обсягів перевезень пасажирів, підвищенням вимог до безпеки та комфорту, а також посиленням міжнародних екологічних стандартів, все більшої актуальності набуває впровадження новітніх технологій у проектування суден. Одним із перспективних напрямів розвитку судових енергетичних систем є використання гібридних пропульсивних установок, які поєднують традиційні двигуни внутрішнього згорання з електричними приводами та акумуляторними системами накопичення енергії.

Пасажирські малі судна відіграють важливу роль у системі водного транспорту, забезпечуючи перевезення людей на внутрішніх водних шляхах, у прибережних зонах, туристичних регіонах та міських акваторіях. Вони широко використовуються для екскурсійних перевезень, транспортного сполучення між населеними пунктами, а також для обслуговування рекреаційних зон. У сучасних умовах до таких суден висувуються підвищені вимоги щодо маневреності, надійності, економічності експлуатації та мінімізації негативного впливу на довкілля.

Традиційні пропульсивні установки, що базуються виключно на використанні двигунів внутрішнього згорання, характеризуються значним споживанням палива та викидами шкідливих речовин у атмосферу. Це зумовлює необхідність пошуку альтернативних рішень, здатних забезпечити зниження рівня шуму, вібрацій, витрат палива та шкідливих викидів. У цьому контексті гібридні пропульсивні системи розглядаються як один із найбільш ефективних напрямів модернізації водного транспорту. Вони дозволяють оптимально поєднувати роботу двигунів внутрішнього згорання та електричних двигунів, забезпечуючи гнучкість експлуатації судна залежно від режимів руху.

Застосування гібридних енергетичних установок на малих пасажирських суднах має низку переваг. Серед них — зменшення витрат палива, підвищення енергоефективності, зниження рівня шуму під час руху, особливо у

міських акваторіях або природоохоронних зонах, а також можливість використання електричного режиму руху на малих швидкостях. Крім того, гібридні системи сприяють підвищенню надійності суднової енергетичної установки завдяки наявності декількох джерел енергії.

У багатьох країнах світу активно впроваджуються проекти суден із гібридними або повністю електричними пропульсивними системами. Це пов'язано як із прагненням зменшити негативний вплив транспорту на навколишнє середовище, так і з необхідністю відповідати міжнародним екологічним нормам і стандартам. Водночас розвиток акумуляторних технологій, силової електроніки та систем управління енергоспоживанням відкриває нові можливості для підвищення ефективності таких установок.

Актуальність теми магістерської роботи полягає у необхідності вдосконалення підходів до проектування пасажирських малих суден з урахуванням сучасних вимог до енергоефективності, екологічної безпеки та економічності експлуатації. Використання гібридних пропульсивних установок дозволяє оптимізувати роботу суднових енергетичних систем, підвищити ефективність використання палива та зменшити рівень шкідливих викидів.

Актуальність даної теми зумовлена необхідністю оновлення флоту внутрішнього водного транспорту, підвищення енергоефективності, екологічності та комфорту перевезень пасажирів на річках, водосховищах і прибережних зонах.

Метою роботи є розроблення проекту сучасного пасажирського малого судна з урахуванням специфічних умов експлуатації на внутрішніх водоймах України, вимог безпеки, остійності та конструктивної надійності корпусу. Проект передбачає створення судна з малою осадкою, низьким рівнем шуму та викидів, а також економічною енергетичною установкою.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- виконати розрахунки водотоннажності та головних розмірів судна;
- побудувати теоретичне креслення та криві елементів плавучості;

- розрахувати остійність і непотоплюваність судна відповідно до вимог Регістру судноплавства України;
- розробити загальне розташування судна з урахуванням комфортного розміщення пасажирів і екіпажу;
- виконати конструктивний набір корпусу із застосуванням легких матеріалів (алюмінієвих сплавів або композиційних);
- обрати оптимальний тип рушійної установки (дизельна, гібридна або електрична);
- розрахувати ходові якості судна та періоди хитавиці;
- скласти стислу специфікацію судна за корпусною та механічною частинами;
- провести економічне обґрунтування проекту та визначити побудівельну вартість.

Об'єктом дослідження є малі пасажирські судна як клас річкових транспортних засобів для перевезення пасажирів у внутрішніх водоймах, оснащених гібридними пропульсивними системами.

Предметом дослідження є проект пасажирського малого судна внутрішнього плавання, включаючи його технічні особливості конструкції, остійності та енергетичної установки з урахуванням нормативних вимог Регістру судноплавства України.

РОЗДІЛ 1. ВИЗНАЧЕННЯ ВОДОТОННАЖНОСТІ ТА ГОЛОВНИХ РОЗМІРЮВАНЬ

1.1. Основні технічні характеристики судна-прототипу

Таблиця 1.1

Основні технічні характеристики судна-прототипу

Основні технічні характеристики	Поз.	Прототип
Довжина максимальна, м	L _{max}	22.7
Довжина між перпендикулярами, м	L _{пп}	22.0
Ширина, м	B	5.90
Висота борту, м	D	2.97
Осадка, м	d	1.42
Водотоннажність, т	Δ	51
Коефіцієнт загальної повноти	C _в	0.617
Коефіцієнт повноти мідель – шпангоуту	C _м	0.628
Коефіцієнт повноти вантажної ватерлінії	C _в	0.713
Експлуатаційна швидкість, вуз	V _е	20
Дальність плавання, милі	R	450
Потужність головного двигуна, кВт	N _е	800
Діаметр гребного гвинта, м	d _в	0.95
Кількість екіпажу, чол.	N _{ек}	3
Маса корпусу, т	P _к	19.38
Маса обладнання, т	P _{об}	7.65
Маса енергетичної установки, т	P _{еу}	8.16
Маса постачання, т	P _{пост}	2.04
Маса палива, т	P _п	3.06
Маса вантажу, т	P _в	10.71
Район плавання	-	Внутр. Водойм.

1.2. Визначення водотоннажності судна та потужності головного двигуна в нульовому наближенні

Водотоннажність судна в нульовому наближенні Δ_0 визначається за формулою [1]:

$$\Delta_0 = \frac{P_{\epsilon}}{\eta_{\epsilon}}, \quad (1.1)$$

де P_{ϵ} – маса вантажу, який перевозиться.

η_b - коефіцієнт водотоннажності за чистою вантажопідйомністю

$$\eta = \frac{P}{\Delta},$$

де $\bar{P}_B$ – маса вантажу судна-прототипу; $\bar{P} = 10.71$ т;

$\bar{\Delta}$ - водотоннажність судна-прототипу= 51 т;

$$\eta = 10.71/51=0.21$$

Таким чином: $\Delta_B = 7.5/0.21 = 35,71$ т.

Потужність головного двигуна в нульовому наближенні визначається за формулою [1]:

$$N_0 = \frac{\Delta_0^{2/3} \cdot V_e^3}{C_N}, \quad (1.2)$$

де V_e – експлуатаційна швидкість ходу судна, вуз; $V_e = 20$ вуз.

C_N – адміралтейський коефіцієнт, який приймається за прототипом [1]:

$$C_N = \frac{\bar{\Delta}^{2/3} \cdot \bar{V}_e^3}{\bar{N}_e} = \frac{51^{2/3} \cdot 20^3}{800} = 137,5,$$

тоді:

$$N_0 = \frac{35,71^{2/3} \cdot 20^3}{137,5} = 622 \text{ кВт},$$

1.3. Визначення водотоннажності судна в першому наближенні

Значення водотоннажності та інших елементів судна можуть бути знайдені шляхом складання рівняння мас, яке має вигляд [1]:

$$\Delta = P_K + P_{об} + P_{ey} + P_n + P_{пост} + P_{зв} + P_e, \quad (1.3)$$

де Δ - масова водотоннажність, т;

P_K – маса за розділом «Металевий корпус»;

$P_{об}$ – маса за розділом «Обладнання»;

P_{ey} - маса за розділом «Енергетична установка»;

P_n – маса за розділом «Паливо»;

$P_{пост}$ – маса за розділом «Постачання»;

$P_{зв}$ – маса за розділом «Запас водотоннажності»;

$P_{в}$ – маса за розділом «Вантаж».

1У першому наближенні всі розділи навантаження проекту виразимо у вигляді функції водотоннажності, після чого рівняння (1.4) матиме вигляд:

$$\Delta = a_k \cdot \Delta + a_{об} \cdot \Delta^{2/3} + a_{ey} \cdot \Delta^{2/3} + a_{пост} \cdot \Delta + a_n \cdot \Delta^{2/3} + a_{зв} \cdot \Delta + P_v \quad (1.3)$$

де a_k – вимірник маси металевого корпусу;

$a_{об}$ – вимірник маси обладнання;

a_{ey} – вимірник маси енергетичної установки;

a_n – вимірник маси палива;

$a_{пост}$ – вимірник маси постачання;

$a_{зв}$ – вимірник маси запасу водотоннажності.

1.3.1. Вимірники маси за розділами розраховуються за даними судна-прототипу за допомогою таблиці Excel:

Таблиця 1.2 Дані судна-прототипа

$\Delta=$	51	т	Вагова водотоннажність		
$P_{г}=$	19,38	т	Вантажопід'ємність		
$N=$	800	кВт	Потужність СЭУ		
$V_{с}=$	20	вузл.	Швидкість ходу		
$L=$	22	м	Довжина по КВЛ		
$B=$	5.90	м	Ширина по КВЛ		
$D=$	2.97	м	Висота борту		
$d=$	1.42	м	Осадка по КВЛ		

Таблиця 1.3 обчислені дані судна, що проектується

$P_{гг} =$	7.5	т	$V =$	20	уз
$\eta_{гг} =$	0,21		$C =$	137.5	
$\Delta_0 =$		т	$V =$	20	уз
$\mu_{гг} =$	60	Чол.	$N =$	622	кВт

Таблиця 1.4 Обчислення вимірників і мас судна, що проектується

розділ	Маса IV·VI	множник	вимірник	значення
II	III	IV	V	VI
$P_K =$	13.57	D	a_K	0,203
$P_{об} =$	5.36	$D2 \square 3$	a_y	0,571
$P_{ey} =$	5.71	$D2 \square 3$	a_c	0,182
$P_{пос} =$	1.43	$D2 \square 3$	a_{zy}	0,778
$P_{пал} =$	2.14	$D2 \square 3$	a_{zl}	0,451
$P_B =$	7.5	$\eta_{гг}$		0,279
$\Delta =$	35.71			0,58

V_s – швидкість судна-прототипу під час випробувань:

$$V_g = V_e + 0,5, \quad V_s = 20 + 0,5 = 20.5 \text{ вуз.}$$

N_{es} – потужність головного двигуна судна-прототипу під час випробувань;

$$N_{es} = N_e \cdot 1,1 = 800 \cdot 1,1 = 880 \text{ кВт.}$$

Визначимо відношення головних розмірів судна-прототипу:

$$\frac{L_{nn}}{B} = \frac{22.7}{5.90} = 3.85; \quad \frac{B}{d} = \frac{5.90}{1.42} = 4,155; \quad \frac{D}{d} = \frac{2,97}{1,42} = 2,09;$$

1.4. Визначення головних розмірювань та їх співвідношень

1.4.1. Відношення висоти борту до осадки

Відношення висоти борту до осадки у значній мірі впливає на об'єм вантажних приміщень, непотоплюваність і остійність. У першому наближенні приймаємо його за прототипом:

$$(D/d) = 2.09$$

1.4.2. Відношення ширини судна до осадки

Відношення ширини судна до осадки приймаємо за прототипом:

$$\frac{B}{d} = \frac{B'}{d'} = 4,155.$$

1.4.3. Відношення довжини до ширини

Відношення довжини до ширини (L/B) знайдемо з умови ходовості (за формулою плавучості) за допомогою відносної довжини l

$$\frac{L}{B} = \sqrt{\frac{l_1^3 \cdot C_{B1} \cdot K_{\text{вч}} \cdot \Phi_{\text{ме}}}{B/d}}, \quad (1.6)$$

де $l_1 = 9,55$ – відносна довжина судна;

$$l = \left(2 + \frac{5}{\sqrt[3]{\Delta}}\right) \cdot V_s^{1/3} = \left(2 + \frac{5}{35.71^{1/3}}\right) \cdot 20^{1/3} = 9,55$$

$C_{B1} = 0,617$ – коефіцієнт загальної повноти;

$K_{\text{вч}} = 1,01$ – коефіцієнт, який враховує виступаючі за обводи теоретичного креслення частини корпусу (скулові кілі, зовнішню обшивку, руль, гвинт тощо);

$\rho = 1,025 \text{ т/м}^3$ – щільність морської води;

$B/d = 4,155$ за прототипом;

визначимо відношення L/B за формулою

$$\frac{L}{B} = \sqrt{\frac{9,55^3 \cdot 0,617 \cdot 1,01 \cdot 1,025}{4,155}} = 11,57$$

якщо $L=22,0$, то

$$B = \frac{L}{4,155} = \frac{22,0}{4,155} = 5,29 \text{ м},$$

тоді визначаємо осадку

$$d = \frac{B}{4,155} = \frac{5,29}{4,155} = 1,28 \text{ м}.$$

через відношення $\frac{D_1}{d_1}$ прототипу, за формулою

$$\frac{D}{d} = (1,07 \cdot 1,8 \cdot a_{\text{в}} + 0,16) \cdot \frac{D_1}{d_1}$$

визначимо $\frac{D}{d}$ для судна, що проектується

$$\frac{D}{d} = (1,07 \cdot 1,8 \cdot 0,279 + 0,16) \cdot 2,09 = 2,1$$

Де $a_{\text{в}} = 0,279$ – вимірник мас вантажу,

тоді висота борту судна, що проектується визначиться так

$$D = d \cdot 2,1 = 1,28 \cdot 2,1 = 2,68 \text{ м}.$$

1.4.4. Головні розмірювання

Маючи значення відношень головних розмірювань і водотоннажності в першому наближенні, вирішимо рівняння плавучості [1]:

$$\Delta_1 = K_{\epsilon\psi} \cdot \phi \cdot C_{B_1} \cdot L_1 \cdot B_1 \cdot d_1. \quad (1.7)$$

$$\Delta_1 = 35.71 \text{ т}$$

Таким чином, маємо у першому наближенні:

$$L_1 = 22.0 \text{ м};$$

$$B_1 = 5.3 \text{ м};$$

$$d_1 = 1.3 \text{ м};$$

$$D_1 = 2.7 \text{ м}.$$

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ ТЕОРЕТИЧНОГО КРЕСЛЕННЯ

2.1. Розробка теоретичного креслення

Процес проектування судна починається з розробки теоретичного креслення, яке зображує поверхню майбутнього судна та дає загальну характеристику його форми. Теоретичне креслення необхідне для розрахунків елементів теоретичного креслення та морехідних якостей майбутнього судна – плавучості, остійності, ходовості, непотоплюваності та для розробки конструктивних креслень.

Розробка теоретичного креслення суховантажного судна виконувалась за допомогою програми DELFTship, Rhinoceros та AutoCAD. Для вибору форми корпусу був взятий прототип, що є найбільш близьким за співвідношенням головних розмірів до проектуваного судна.

Математична модель корпусу була побудована за допомогою комп'ютерної програми.

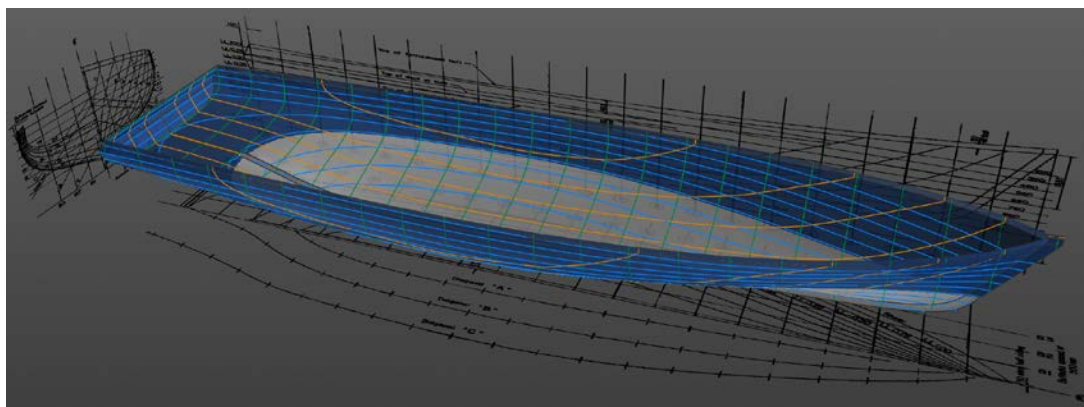


Рис. 2.1 Суховантажне судно, що проектується за допомогою програми DELFTship

DELFTship - це програма для візуального моделювання корпусу судна та аналізу його стабільності. Вона розроблена з використанням передових технологій, що дозволяє отримувати всі необхідні дані для розрахунків безпосередньо з моделі.

Основні можливості DELFTship включають:

DELFTship Free: безкоштовна версія програми, яка надає можливість моделювати форму корпусу судна. Вона має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, базу даних з моделями, прості 3D-інструменти проектування та гідростатичні деталі.

Розрахунок складається в визначенні табличного значення базисного надводного борту та внесення до цієї величини поправок, які враховують відхилення геометричних характеристик проектуемого судна від стандартного.

2.3. Розрахунок кривих елементів теоретичного креслення

Для теоретичного креслення корпусу суховантажного судна, яке було розроблено, були розраховані елементи теоретичного креслення. Розрахунок містить у собі визначення загальноприйнятих характеристик зануреного об'єму і діючої ватерлінії. За результатами розрахунків побудовані криві елементів теоретичного креслення, які представлені на кресленні.

Отчет по гидростатике проекта

Разработчик

Автор

Примечание

Имя файла Motor boat with background images.fbm

Проектная длина	22,000 м	Положение миделя	15,952 м
Длина модели плавучести	21,966 м	Плотность воды	1,0250
Проектная ширина	5,300 м	Средняя толщина обшивки	0,0000 м
Максимальная ширина	5,330 м	Добавочный коэффициент	1,0000
Проектная осадка	1,300 м		

Свойства объема		Свойства плоскости ВЛ	
Теор. объём	28,944 m ³	Длина по ватерлинии	18,420 м
Общий вытесненный объём	28,944 m ³	Ширина по ватерлинии	4,739 м
Водоизмещение	29,668 t	Особые точки и проёмы	90,0 Вращать фрагмент на 1 градус вправо.
Блокирующий коэффициент	0,2551	Площадь ватерлинии	60,70 m ²
Призматический коэффициент	1,5401	Кэфф. полноты ватерлинии	0,6953
Верт. призматич. коэффициент	0,3668	ЦТ плавающего тела в плоскости ВЛ	9,752 м
Площадь смоченной поверхности	79,32 m ²	Поперечный момент инерции	85,010 m ⁴
Продольный центр водоизмещения	9,851 м	Продольный момент инерции	1059,977 m ⁴
Продольный центр водоизмещения	-33,120 %		
Вертикальный центр водоизмещения	0,982 м		
Общая длина погруженного копуса	18,420 м		
Общая ширина погруженного корпуса	4,739 м		

Свойства миделя		Начальная остойчивость	
Площадь миделя	1,02 m ²	Поперечн. метацентрическая высота	3,919 м
Контур	0,1656	Продольная метацентрическая высота	37,603 м

Поперечная плоскость	
S дп	18,66 m ²
Продольный центр бокового сопротивления	10,117 м
Вертикальный центр бокового сопротивления	0,767 м

Следующие свойства слоя вычислены для обеих сторон судна

Положение	Площ m ²	Толщина м	Вес t	Прод. ЦТ м	Поперечн. ЦТ м	Верт. ЦТ м
Слой 0	158,67	0,000	0,000	9,623	0,000 (CL)	1,346

Площади сечений									
Положение м	Площ m ²	Положение м	Площ m ²	Положение м	Площ m ²	Положение м	Площ m ²	Положение м	Площ m ²
1,031	0,00	5,156	2,02	9,281	2,71	13,406	1,84	17,531	0,55
2,063	0,30	6,188	2,42	10,313	2,62	14,438	1,49	18,563	0,29
3,094	0,61	7,219	2,63	11,344	2,43	15,469	1,17	19,594	0,11
4,125	1,33	8,250	2,74	12,375	2,14	16,500	0,86	20,625	0,00



Рис 2.2 Площини шпангоутів по довжині судна

Freeship — це безкоштовна програмна система для проєктування корпусів суден та плавзасобів, яка використовується на етапі попереднього проєктування. Програма дозволяє створювати та редагувати 3D-геометрію корпусу, аналізувати його гідростатичні характеристики та виконувати базові розрахунки остійності.

Основні можливості Freeship

3D-моделювання корпусу на основі NURBS-поверхонь

Формування теоретичного креслення (ватерлінії, батокси, шпациї)

Гідростатичні розрахунки: осадка, метацентрична висота, центр ваги, одотоннажність

Криві остійності (GZ-криві) для оцінки стійкості судна

Аналіз поперечної та поздовжньої остійності

Моделювання поділу корпусу на відсіки та перевірка непотоплюваності

Можливість експорту проєкту у DXF та інші формати для подальшої роботи в CAD-системах

Розрахунок параметрів гідростатики виконувався за допомогою програми Freeship.

2.2 Таблица гідростатики в залежності від осадки судна

NOTE 1: Draft (and all other vertical heights) is measured above the lowest point of the hull! (Z= 0.000)
NOTE 2: All calculated coefficients based on actual dimensions of submerged body.

Lwl : Length on waterline
Bwl : Beam on waterline
Volume : Displaced volume
Displ. : Displacement
LCB : Longitudinal center of buoyancy, measured from the aft perpendicular at X=0.0
VCB : Vertical center of buoyancy, measured from the lowest point of the hull
Cb : Block coefficient
Am : Midship section area
Cm : Midship coefficient
Aw : Waterplane area
Cw : Waterplane coefficient
LCF : Waterplane center of floatation
Cp : Prismatic coefficient
S : Wetted surface area
KMT : Vertical of transverse metacenter
KML : Longitudinal transverse metacenter

Draft	Trim	Lwl	Bwl	Volume	Displ.	LCB	VCB	Cb	Am	Cm	Aw	Cw	LCF	Cp	S	KMT	KML
m	m	m	m	m ³	tonnes	m	m	[-]	m ²	[-]	m ²	[-]	m	[-]	m ²	m	m
0.000	0.000	17.920	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.000	0.0000	0.000	0.0000	0.000	0.0000	0.000	0.000	0.000
0.100	0.000	19.447	1.088	1.016	1.041	8.035	0.063	0.4801	0.061	0.5572	17.084	0.8076	8.164	0.8616	17.667	1.440	410.41
0.200	0.000	19.867	1.714	3.255	3.336	8.169	0.125	0.4778	0.192	0.5594	27.350	0.8030	8.288	0.8541	28.878	1.831	213.00
0.300	0.000	20.140	2.228	6.432	6.593	8.253	0.188	0.4777	0.376	0.5622	36.049	0.8033	8.381	0.8497	38.729	2.118	145.90
0.400	0.000	20.350	2.693	10.437	10.698	8.318	0.251	0.4762	0.606	0.5625	43.927	0.8016	8.458	0.8465	47.913	2.362	111.84
0.500	0.000	20.510	3.136	15.209	15.590	8.370	0.314	0.4729	0.878	0.5598	51.438	0.7997	8.512	0.8449	56.843	2.608	91.370
0.600	0.000	20.658	3.564	20.716	21.234	8.414	0.377	0.4690	1.190	0.5564	58.678	0.7971	8.556	0.8430	65.604	2.849	77.617
0.700	0.000	20.787	3.981	26.940	27.614	8.451	0.440	0.4651	1.540	0.5527	65.775	0.7949	8.593	0.8415	74.304	3.093	67.738
0.800	0.000	20.914	4.394	33.869	34.716	8.484	0.504	0.4607	1.929	0.5487	72.794	0.7921	8.624	0.8397	83.000	3.341	60.322
0.900	0.000	21.040	4.802	41.496	42.534	8.512	0.568	0.4563	2.355	0.5448	79.751	0.7893	8.653	0.8376	91.705	3.591	54.532
1.000	0.000	21.163	5.211	49.818	51.064	8.538	0.632	0.4518	2.818	0.5408	86.704	0.7863	8.679	0.8353	100.46	3.845	49.922
1.100	0.000	21.285	5.620	59.021	60.497	8.551	0.697	0.4485	3.312	0.5358	94.467	0.7897	8.711	0.8371	111.37	4.197	46.063
1.200	0.000	21.412	5.633	68.625	70.340	8.586	0.760	0.4742	3.875	0.5732	97.430	0.8078	8.891	0.8272	117.98	3.960	41.769
1.300	0.000	21.544	5.646	78.482	80.444	8.634	0.822	0.4963	4.429	0.6034	99.639	0.8192	9.043	0.8225	124.07	3.728	38.333
1.400	0.000	21.679	5.658	88.538	90.751	8.688	0.882	0.5155	4.985	0.6292	101.44	0.8269	9.173	0.8193	129.90	3.529	35.513
1.500	0.000	21.815	5.671	98.759	101.23	8.744	0.941	0.5322	5.542	0.6515	102.99	0.8324	9.287	0.8169	135.60	3.365	33.162
1.600	0.000	21.952	5.684	109.13	111.85	8.801	0.999	0.5466	6.101	0.6708	104.37	0.8365	9.391	0.8148	141.22	3.232	31.180
1.700	0.000	22.089	5.697	119.62	122.61	8.857	1.056	0.5592	6.661	0.6878	105.64	0.8395	9.486	0.8130	146.80	3.124	29.491
1.800	0.000	22.227	5.709	130.24	133.50	8.911	1.112	0.5702	7.223	0.7028	106.82	0.8417	9.574	0.8113	152.35	3.039	28.038
1.900	0.000	22.364	5.722	140.97	144.50	8.965	1.169	0.5798	7.786	0.7162	107.88	0.8430	9.653	0.8096	157.85	2.970	26.748
2.000	0.000	22.499	5.735	151.80	155.60	9.016	1.224	0.5883	8.351	0.7281	108.80	0.8432	9.717	0.8079	163.23	2.917	25.520

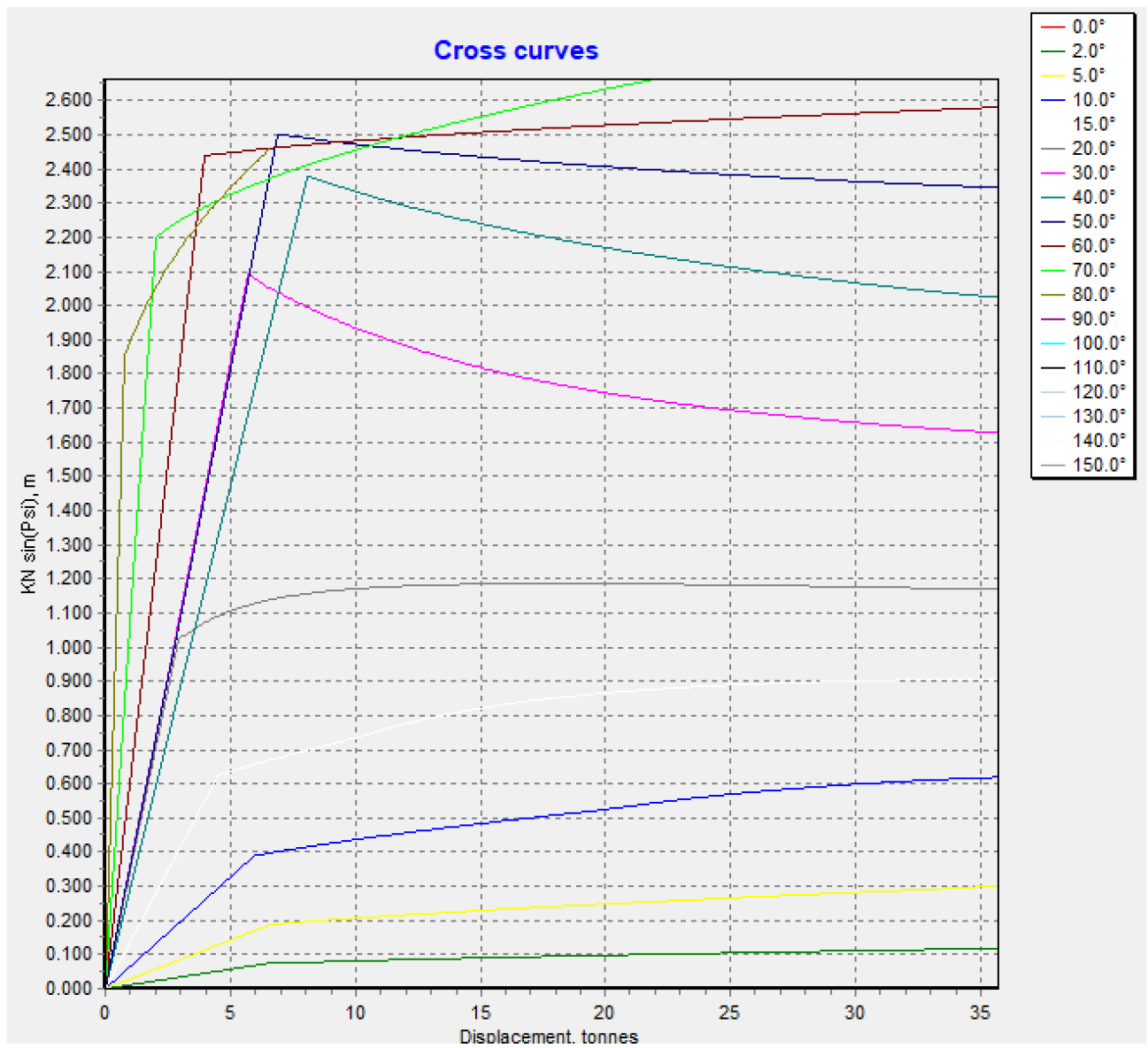


Рис. 2.3 Графік гідростатики в залежності від осадки судна

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ОСТІЙНОСТІ СУДНА НА ВЕЛИКИХ КУТАХ КРЕНУ

Метою розрахунку є перевірка відповідності характеристик остійності судна вимогам Правил Регістру Судноплавства України [7].

Згідно частині IV «Остійність» Правил Регістру остійність суден необмеженого району плавання вважається за критерієм погоди K достатньою, якщо:

1) судно перебуває під дією вітру постійної швидкості, який направлений перпендикулярно до діаметральної площини судна і якому відповідає плече вітрового моменту, що кренить, l_{w1} (рис. 4.1);

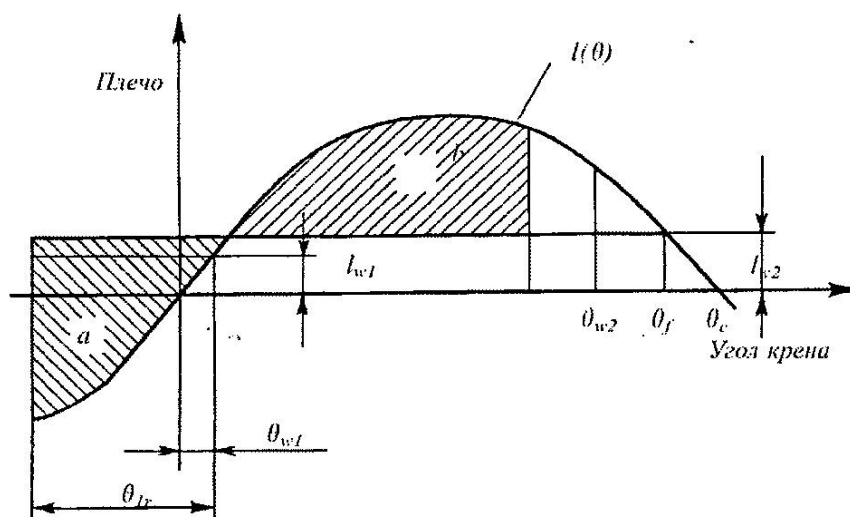


Рис. 3.1

2) від статичного кута крену θ_{w1} , спричиненого постійним вітром і такого, що відповідає першій точці перетину горизонтальної прямої l_{w1} з кривою відновлюючих плеч $l(\theta)$, під дією хвиль судно крениться на борт під вітром на кут, який дорівнює амплітуді бортової хитавиці θ_{lr} ;

3) на судно, яке нахилилося, динамічно діє порив вітру, якому відповідає плече моменту, який кренить l_{w2} ;

4) розраховуються і порівнюються площі a і b , які заштриховані на рис. 3.1. Площа b обмежена кривою $l(\theta)$ відновлюючих плеч, горизонтальною прямою, яка відповідає плечу l_{w2} моменту, який кренить, і кутом крену $\theta_{w2} = 50^\circ$; або кутом заливання θ_f , або кутом крену θ_c , що

відповідає точці другого перетину прямої l_{w2} з кривою відновлювальних плечей, в залежності від того,

який з цих кутів менше. Площа a обмежена кривою відновлюючих пліч, прямою l_{w2} і кутом крену, який дорівнює $\theta_1 - \theta_{1r}$;

5) остійність судна за критерієм погоди $K = b/a$ вважається достатньою, якщо площа b дорівнює або більша площі a , або $K \geq 1$. Правила рекомендують приймати цю величину не менше 1,5;

6) статичний кут крену θ_{w1} від дії постійного вітру не повинен перевищувати 16° , або кут, що дорівнює 0,8 кута входу у воду кромки відкритої палуби, в залежності від того, який з них менший.

7) h_0 - початкова метацентрична висота, що характеризує кут нахилу дотичної до початкової гілки діаграми.

3.1 Побудова діаграми статичної остійності

Діаграма статичної остійності (ДСО) - це графік залежності відновлюючого моменту від кута крену (рис. 3.1). Її основні характеристики:

l_{max} - максимальне плече статичної остійності;

θ_{max} - кут максимуму діаграми;

θ - кут заходу діаграми, що відповідає умові $l_{cm} = 0$;

h_0 - початкова метацентрична висота.

В магістерській роботі перевірка остійності виконується для випадку:

- судно у повному вантажу зі 100% запасів.

Пантокарені будуємо за даними таблиці 3.1

Таблиця 3.1

	0.0°	5.0°	10.0°	15.0°	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°
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4.000	<->	<->	<->	<->	1.072	<->	<->	<->	2.439	2.290	2.262	<->	<->	<->	<->	<->	<->	<->
8.000	0.000	0.196	0.415	0.697	1.156	1.997	2.382	2.491	2.470	2.409	<->	<->	<->	<->	<->	<->	<->	<->
12.000	0.000	0.216	0.456	0.776	1.179	1.882	2.292	2.457	2.493	2.497	<->	<->	<->	<->	<->	<->	<->	<->
16.000	0.000	0.233	0.492	0.833	1.186	1.801	2.225	2.429	2.512	2.570	<->	<->	<->	<->	<->	<->	<->	<->
20.000	0.000	0.248	0.525	0.866	1.186	1.744	2.170	2.407	2.528	2.634	<->	<->	<->	<->	<->	<->	<->	<->
24.000	0.000	0.262	0.562	0.885	1.183	1.703	2.124	2.388	2.543	<->	<->	<->	<->	<->	<->	<->	<->	<->
28.000	0.000	0.276	0.589	0.897	1.179	1.671	2.084	2.371	2.557	<->	<->	<->	<->	<->	<->	<->	<->	<->
32.000	0.000	0.288	0.607	0.904	1.174	1.646	2.050	2.357	2.570	<->	<->	<->	<->	<->	<->	<->	<->	<->
36.000	0.000	0.303	0.620	0.908	1.169	1.626	2.022	2.344	2.582	<->	<->	<->	<->	<->	<->	<->	<->	<->
37.510	0.000	0.309	0.624	0.909	1.166	1.620	2.012	2.340	2.586	<->	<->	<->	<->	<->	<->	<->	<->	<->

Таблиця 3.2 Плечі статичної та динамічної остійності

θ , град	$\sin \theta$	l_f	$l_{cm} = l_f \cdot Z_g \cdot \sin \theta$	Σl_{cm}	$L_d = d\theta/2 \cdot \Sigma l_{cm}$
0	0	0	0	0	0
10	0,174	1,494	0,12	0,12	0,011
20	0,342	2,992	0,27	0,51	0,044
30	0,5	4,5	0,41	1,19	0,103
40	0,643	5,991	0,48	2,08	0,181
50	0,766	7,491	0,45	3,01	0,262
60	0,866	8,991	0,3	3,76	0,327
70	0,94	9,654	0,03	4,09	0,356
80	0,985	10,102	-0,29	3,83	0,333

3.2 Перевірка остійності за вимогами Правил Регістру.

3.2.1 Вимоги Правил регістру до діаграми статичної остійності

Діаграма статичної остійності повинна відповідати наступним вимогам Регістру:

- кут закату діаграми повинен бути не менше 60^0 (для судна, яке проектується кут закату 88^0);
- кут максимуму діаграми повинен бути не менше 30^0 (для судна, що проектується кут максимуму діаграми складає 54^0);
- максимальне плече діаграми статичної остійності повинне бути не менше 0,2 при куті крену $\theta_m \geq 30^0$ (для судна, що проектується максимальне плече 1,06 м).
- для пасажирських суден значення початкової метацентричної висоти повинно бути не менше 0,15 м.

3.2.2 Розрахунок критерія погоди.

Критерій погоди є одною з основних характеристик остійності судна, розрахунок якої проводиться відповідно вимогам Правил Регістру. Критерій погоди розраховується за формулою:

$$K_C = \frac{M_C}{M_V} \geq 1$$

де: M_C – мінімальний опрокидний момент, $\text{kH} \cdot \text{m}$;

M_V – момент, що кренить судно, $\text{kH} \cdot \text{m}$

Показники, які повинні відповідати вимогам правил Регістру розраховується в програмі Freeship.

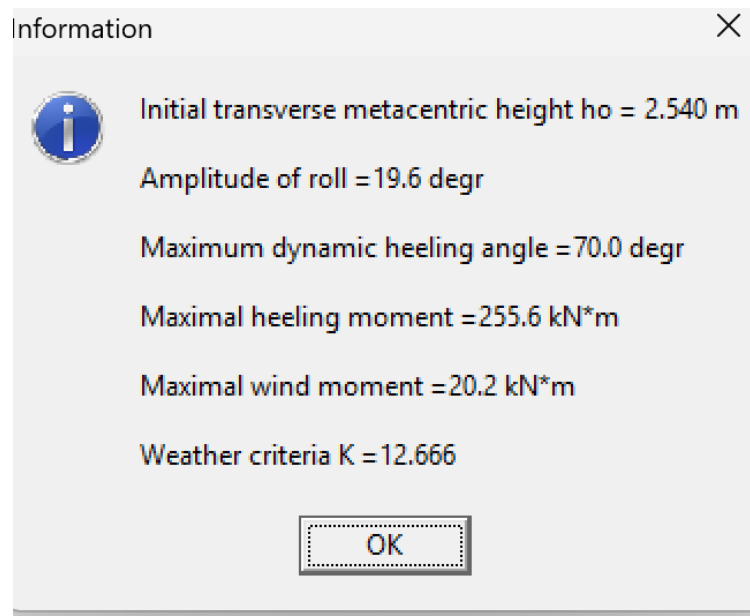


Рисунок 3.1 Розрахунок остійності судна

Діаграма статичної остійності повинна відповідати наступним вимогам Регістру:

- кут закату діаграми повинен бути не менше 60° (для судна, яке проектується кут закату 87°);
- кут максимуму діаграми повинен бути не менше 30° (для судна, що проектується кут максимуму діаграми складає 50°);
- максимальне плече діаграми статичної остійності повинне бути не менше 0,2 м при куті крену $\theta_m \geq 30^\circ$ (для судна, що проектується максимальне плече 0,882 м).

- для суховантажних суден значення початкової метацентричної висоти повинно бути не менше 0,15 м. для судна, що проектується, початкова метацентрична висота складає: $h_0 = r + Z_c - Z_g = h_0 = 2.54$

РОЗДІЛ 4. НАБОР КОРПУСА ПО ПРАВИЛАМ РЕГІСТРУ

Набор корпусу виконаний відповідно до вимог Правил класифікації та побудови суден внутрішнього плавання Регістру Судноплавства України 2020 року (далі «Правила» та Регістр). [17]

Система координат і правила знаків

За центр координат прийнята точка перетину площин мідель-шпангоута, діаметральної (ДП) і основний (ОП).

За вісь абсцис OX - лінія перетину ДП і ОП. Позитивний напрямок - в ніс (від площини мідель-шпангоута).

За вісь аплікату OZ - лінія перетину ДП і площині мідель-шпангоута. Позитивний напрямок - вгору (від ОП).

За вісь ординат OY - лінія перетину ОП і площині мідель-шпангоута. Позитивний напрямок - на правий борт (від ДП).

Правило знаків для диферента: "+" - на ніс, "-" - на корму.

Правило знаків для крену: "+" - на правий борт; "-" - на лівий борт.

№	Зміст (формула)	Позн	Має	Є	Примітка
ЧАСТИНА І КЛАСИФІКАЦІЯ					
1.1.5	Валова місткість				
		GT		45,86	
2	Клас судна			K(E) B2	Пасажирське судно
	район плавання			B2	
ЧАСТИНА II КОРПУС					
1.1.1.	Головні розміри, осадка				
1					
	Висота борта, м	D		2.70	
	Довжина, м	L		22.00	
	Осадка, м	d		1.30	
	Ширина, м	B		5.30	
1.2	МАТЕРІАЛИ				
	... вуглецевої сталі з межею плинності 235 МПа				Сталь категорії А
1.3	ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО КОНСТРУКЦІЇ КОРПУСУ				
1.3.7	Мінімальні товщини і шпация				Для судна класу B2 довжиною L = 24,00 м
1.3.7.	Товщини листів повинні бути не менше:				табл. 1.3.7.1
1					
1.	Зовнішня обшивка в середній частині судна і кормовій частині		3,0	5,0	
2.	Скуластий пояс зовнішньої обшивки в середній частині судна і кормовій частині		4,5	5,0	

4.	Ширстрека і палубний стрінгер в середній частині судна		4,5	5,0	.
5.	Настил палуби суховантажних суден між бортом і поздовжнім комінгсом і в середній частині інших суден (крім нафтоналивних)		4,0	5,0	
11.	Обшивка непроникних перегородок, за винятком форпикової		3,0	5,0	
12.	Обшивка перегородки форпіка		3,0	5,0	
13.	Нижній пояс непроникних перегородок суховантажних суден		3,0	6,0	
16.	Настил верхньої палуби в краях на відкритих ділянках, настил і палубний стрінгер міцних палуб надбудов, які беруть участь в об-щем вигин		3,0	6,0	
17.	Настил верхньої палуби в краях на ділянках, закритих надбудовами		3,0	5,0	
20.	Зовнішня обшивка в носовій частині		4,0	5,0	
23.	Безперервні поздовжні комінгси вантажних люків		5,5	6,0	
24.	поперечні комінгси		4,0	5,0	
1.3.7. 2	Шпація повинна прийматися не більше:				

	між балками поздовжнього набору	a	650	650	Виконується
	між балками поперечного набору	a	650	500	Прийнята шпация 500 мм.
	Рекомендована шпация	a	550	500	Прийнята шпация 500 мм.
1.3.7.4	Якщо шпация прийнята менше 550 мм, то товщини листів, зазначені в п.п. 1 - 8, 11 - 14 і 16 - 20 табл. 1.3.7.1, можуть бути зменшені пропорційною зменшенню шпации. Зменшення товщини листів не повинно перевищувати 10%.				
2	ЕЛЕМЕНТИ КОНСТРУКЦІЇ КОРПУСУ				
2.1	ЗОВНІШНЯ ОБШИВКА				
2.1.1	Обшивка днища				
2.1.1.1	При поперечної системі набору днища товщина листів днищевої обшивки s, мм, повинна бути не менше визначеної за формулами:				
.4	на буксирах і судах технічного флоту в межах 0,5L середній частині судна				
	$s = 1,7a\sqrt{((L + N/L)(d + 0,3h_B)/D)}$	s	3,75	5,00	
	відстань між флорами, але не менше 0,5 м	a	0,55		
	висота 5% хвиль в зоні експлуатації, м	h _B	0,60		
	сумарна специфікаційна потужність головних двигунів, кВт	N	622		
	Поза зазначеного району, в напрямку до країв судна, товщина листів може поступово зменшуватися по 1 мм до				

	товщини рівної s , мм, що визначається відповідно до 2.1.1.1.1....				
.6	Прийнята товщина листів днищевої обшивки в середній частині судна повинна бути не менше визначеної за формулою:				
	для буксирів і суден технічного флоту				
	$s = 1,7a\sqrt{L} + 0,5$	s	3,54	5,00	
2.1.1.2	$s_0 = 5,5a\sqrt{(d + 0,5h_B)}$	s_0	2,87	5,00	
		s_0	3,00	5,00	мінімальне значення
2.1.1.3	Якщо по днищу встановлені днищеві стрингери, виконані згідно 2.2.4.5, то товщина s , визначена за вказаним в 2.1.1.1 формулами може бути зменшена на 6% при трьох днищевих стрингерах і на 3% для кожного наступного днищевого стрингера.				По днищу встановлені стрингера
2.1.1.5	На всіх типах суден і при будь-якій системі набору товщина днищевої обшивки не повинна бути менше s_0 , певної в 2.1.1.2.	s_0	3,00	5,00	
2.1.2	Місцеве потовщення обшивки днища				
2.1.2.2	Товщина листів днищевої обшивки s , що з'єднуються з фундаментами під головні двигуни, повинна бути не менше визначеної за формулою, мм				
	$s = 0,8\sqrt{L(1 + 16,3N_1/nL)}$	s	2,90	5,00	
2.1.3	скуласті листи				
2.1.3.1	Товщина скулових листів s вантажних судів повинна бути не менше визначеної за формулою, мм				

	$s = 1,15 \sqrt{L}$	s	3,74	5,00	
	але не менше товщини суміжних листів днищевої або бортової обшивки, в залежності від того, що більше.				
2.1.3. 3	За межею циліндричної вставки корпусу судна товщина скулових листів може бути зменшена до фактично прийнятої товщини дніщевих листів.				Товщина зовнішньої обшивки по всій довжині корпусу прийнята однаковою.
2.1.4	Обшивка бортів				
2.1.4. 1	Товщина обшивки борту s вантажних судів повинна бути не менше визначеної за формулою, мм				
	$s = 1,55a \sqrt{L}$	s	4,93	5,00	
2.1.4. 2	Ширстрек				
	Ширина ширстрека в середній частині судна або в межах вантажних трюмів вантажних судів повинна бути не менше визначеної за формулою				
	$b_{ш} = 0,1D$	$b_{ш}$	0,12		Виконується
	Товщина ширстрека s повинна бути не менше визначеної за формулою, мм				

	$s = 2,8a \sqrt{L}$	s	15,04	5,00	Виконується з урахуванням скруглення п.1.3.7.6
	Товщина ширстрека в середній частині судна повинна бути не менше товщини прилеглих листів обшивки борту чи палубного стрингери (що більше).	s		5,00	
2.2	ДНИЩЕВИЙ НАБІР НА СУДАХ БЕЗ ПОДВІЙНОГО ДНА І В МІСЦЯХ, ДЕ ДРУГЕ ДНО ВІДСУТНЄ				
2.2.1.5	Коефіцієнт k_1				
	$k_1 = k_0 (1 + 0,25 (I_p/I_n - 0,83))$	k_1	0,57		
де	коефіцієнт, визначений за графіком 2.2.1.5	k_0	0,55		
	момент інерції флора, см^4	I_p	625,9 1		
	момент інерції днищового стрингера, см^4	I_n	625,9 1		
2.2.1.8	Момент опору суцільних флорів W в машинному відділенні, повинен бути не менше визначеного за формулою, см^3				
	Момент опору ... повинен бути не менше, см^3				
	$W = 6,5adB^2 + 20$	W	99,73	192,34	Двутавр 20
2.2.4	Днищевой стрингери і вертикальний кіль				
2.2.4.2	На судах, не зазначених в 2.2.4.1, мають ширину B менше 6 м, незалежно від системи набору днища, досить встановити тільки вертикальний кіль в діаметральній площині судна.				По днищу встановлені два стрингера

2.2.4.3	Вертикальний кіль повинен йти вздовж судна від форштевня до ахтерштевня ...				Вертикальний кіль встановлений
	Профіль вертикального кіля відповідає флору				Виконується
2.4	ПАЛУБИ				
2.4.1	Настил розрахункової палуби				
2.4.1.1	При поперечної системі набору товщина настилу розрахункової палуби s повинна бути не менше визначеної за формулами, мм:				
.1	на вантажних судах, буксирах, толкачів та судах технічного флоту в межах 0,5L середній частині судна, а також в межах вантажних трюмів				
	$s = 1,2 k \sqrt{[(L + N/L)(d + 0,3h_B)/D]} \sqrt{[a^2(1 + l/L)]}$	s	4,09	5,00	Виконується
де	для буксирів, штовхачів і суден технічного флоту, а також для грузових суден при послідовності завантаження "В"	k	1,00		
	Загальна довжина: вантажного трюму, м, для вантажних суден; машинного відділення, м, для інших судів.	l	11,00		
	сумарна специфікаційні потужність головних двигунів, кВт	N	154,0 0		
	висота 5% хвиль в зоні експлуатації, м	h _B	0,60		
2.4.1.3	Товщина настилу палуби s при будь-якій системі набору в межах 0,5L середній частині судна повинна бути, однак, не менше, мм				
	$s = k \sqrt{L}$				
	але не менше 3 мм, а для нафтоналивних суден не менше 5 мм,	s	2,28	5,00	

		k	0,70		Виконується
2.4.1.4	Якщо є палубні вирізи шириною більше 0,2 В, то товщина настилу палуби, визначена за 2.4.1.1 і 2.4.1.2, повинна бути збільшена в районі вирізів пропорційно величині:				
	$3\sqrt{[0,8B / (B - C)]}$		1,23	5,00	
де	ширина палубного вирізу, м	C	1,98		
	збільшення товщини листів можна замінити установкою поздовжніх підкріплень або комінгсів, довжина яких повинна бути не менше 3 - кратної довжини вирізу або 2D, залежно від того, що менше.				
2.4.1.5	Товщина настилу палуби, необхідна для середньої частини судна, в напрямку до країв судна може плавно зменшуватися до мінімальної товщини, яка вимагається згідно з 2.4.1.3.				
2.6	КОМІНГСИ ПАЛУБНИХ ВИРІЗІВ				
2.6.1	Вирізи вантажних люків ...				
	Висота комінгса, як правило, повинна бути не більше 90 товщини стінки комінгса. При більшій висоті ...		<450	200	Виконується. Підкріплення стінки комінгса горизонтальним ребром не потрібно.
2.6.2	Поздовжні комінгс				
2.6.2.2	Лист стінки поздовжнього безперервного комінгса повинен мати товщину, рівну товщині суміжного палубного стрингери згідно 2.4.2.1.	s	5,00	5,00	Виконується.

	Полку верхньої кромки комінгса, виконана з профілю, відповідаючого прийнятої конструкції для укладання кришок люків або пересування їх, повинна мати ...				Оскільки комінгс не призначений для укладання кришок і їх пересування і має висоту всього 200 мм, а тільки виконує роль ватервейс, полку на ньому не встановлюється.
	Момент опору поперечного перерізу полиці комінгса відносно вертикальної осі W з урахуванням приєднаного паска шириною, рівній 25s, повинен бути не менше, см ³				
	$W = 2s^2$	W	50,00		
де	товщина стінки комінгса, мм	s	5,00		
	Полку комінгса повинна бути встановлена ближче до верхньої кромки комінгса і приварена до нього безперервним двостороннім швом.				
2.6.2.3	Полка комінгса...				Комінгс вирізу не має полки.
2.6.2.4	Поздовжні комінгси довжиною менш 4D, які беруть до загальної поздовжньої міцності судна, повинні мати момент опору відносно горизонтальної осі W не менше визначеного за формулою, см ³	4D	4,00	2,50	
	$W = kpl^2 (B - b)$	W	1,49	105,83	Уголок 50x50x5 и лист h=200 мм, s=5.
де	k - коефіцієнт при з'єднанні поздовжніх комінгсів з поперечними ... без підкріплення пілерсів	k	0,14		

	p - середнє навантаження на палубу, але не менш 4 кПа	p	5,00		
	l - довжина люка	l	2,50		
	b - ширина люка	b	1,98		
2.6.3	Поперечні комінгси				
2.6.3.1	Товщина листів поперечних комінгсів повинна бути дорівнює товщині стінок поздовжніх комінгсів ...		5,00	5,00	Виконується.
	Якщо поперечні комінгси приєднуються без застосування пілерсів до поздовжніх комінгса, що забезпечує загальну поздовжню міцність судна ...				Поздовжні комінгси не забезпечують загальну поздовжню міцність.
2.6.3.2	Верхня кромка комінгсів вантажних люків повинна бути підкріплена-на горизонтальній смугою ...				Вантажний люк відсутній.
2.7	ПЕРЕГОРОДКИ				
2.7.1	Розташування перегородок				
2.7.1.1	На всіх суднах повинна бути встановлена непроникне форпікове перебирання ..				Виконується
	Відстань форпікового перебирання до носового перпендикуляра має бути не менше 0,04L і не більше 0,04L + 2 м.				
	0,04L =		0,424		
	0,04L + 2 =		2,424		
				1,10	Форпікова перебірка

2.7.1. 2	На всіх суднах довжиною понад 25 м повинна бути встановлена непроникне ахтерпікове перебирання ...				Виконується.
2.7.1. 3	На самохідних і несамохідних судах з машинним відділенням в корпусі судна, машинне відділення повинно бути обмежено водонепроникними перегородками.				Виконується.
2.7.1. 4	На суховантажних судах...				Не застосовується. Судно не суховантажне.
2.7.1. 5	Всі поперечні непроникні перегородки повинні йти від днища до палуби надводного борту.				Виконується.
2.7.1. 6	Пристрій дверей і лазів ...				Виконується. У форпикових перегородках встановлені квадратні горловини на часто розташованих болтах для забезпечення доступу в період побудови.
2.7.1. 7	Всі труби, кабелі ... проходять через непроникні перегородки ...				Виконується. Через непроникні перегородки не проходять труби і кабелі.
2.7.1. 8	На суднах з подвійним дном і подвійними бортами ...				Не застосовується. Подвійного дна і

					подвійних бортів немає.
2.7.2	Листи обшивки перегородок				
2.7.2.1	Товщина листів обшивки перегородок s повинна бути не менше визначеної за формулою, мм				
	$s = 0,9az + k$		4,04	5,00	Виконується
де	a - шпация стійок, м		0,60		
	z - висота, м		1,00		
	k - коефіцієнт		3,50		для форпикової переборки
2.7.2.2	На вантажних судах ...				Не застосовується. Судно не вантажне.
2.7.2.3	У машинному відділенні пояс обшивки перегородок, що примикає до днища ...				Насосне відділення обмежена в носовій частині зовнішньої обшивкою і горловинами
2.7.2.4	Товщина горизонтальної ділянки - уступу ...				Не застосовується. Перебирання не мають уступів.
2.7.3	Стійки перегородок				
2.7.3.1	Відстань між стійками перебирання не повинно перевищувати 0,5 м для таранної перегородки і 0,6 м для інших перегородок. При поздовжній системі набору днища або палуби вертикальні стійки перегородок слід розташовувати в площинах днищевих або підпис-Лубни балок.				Як стійок прийняті вертикальні куточки горловини в перебиранні форпіка.

2.7.3.2	Момент опору стояків перегородок з кінцями, обрізаними "на вус", повинен бути не менше визначеного за формулою, см ³				
	$W = k a z l^2 + 3$	W	4,74	32,66	Кутник 75x75x5
де	k - коефіцієнт, що дорівнює для форпікового перебирання	k	5		
	z - висота від середини довжини до верхньої палуби, м	z	0,61		
	l - найбільший проліт стійки між опорами, м	l	1,20		
	a - шпация стійок, м	a	0,60		
2.7.4	Верхня балка переборки				Всі переборки примикають до палубі.
2.7.5	Гофровані переборки				Всі переборки плоскі.
2.11	ФУНДАМЕНТИ ПІД МЕХАНІЗМИ ТА КОТЛИ				
2.11.1	Фундаменти під головні двигуни				Головні двигуни відсутні.
2.11.2	Фундаменти під допоміжні та інші механізми				
	Товщина поздовжніх стінок балок повинна дорівнювати товщині флори. А площа перетину пасків балок повинна бути на 50% більше площі пасків флори.				Виконується
2.11.3	Перехід від повної висоти фундаментів до нормальної висоті набору корпусу повинен виконуватися плавно за допомогою книц.				Виконується

РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНОК ПЕРІОДІВ ХИТАВИЦІ ТА ХОДОВОСТІ

5.1. Розрахунок періодів хитавиці

Розрахунок проводиться для судна у повному вантажу зі 100% запасів. Період власних коливань судна при бортовій хитавиці визначається за формулою [36]:

$$\tau = 0,58 \cdot B \cdot \sqrt{\left[1 + 4 \cdot \left(Z_g^2 / D^2\right) / \sqrt{h_0}\right]}; \quad (5.1)$$

де B - ширина судна, м; $B = 5.30$ м;

D - висота борту, м; $D = 2.70$ м;

Z_g - апліката центру тяжіння судна, м; $Z_g = 1.00$ м;

Z_c - апліката центру величини судна, м; $Z_c = 1.15$ м (за кривими елементів теоретичного креслення);

$$h_0 - \text{поперечна метацентрична висота, м; } h_0 = r + Z_c - Z_g, \text{ м} \quad (5.2)$$

r - поперечний метацентричний радіус, м; $r = 4,5$ м (за кривими елементів теоретичного креслення);

$$\tau = 0,58 \cdot 5.30 \cdot \sqrt{\left[1 + 4 \cdot (1^2 / 2.70^2) / \sqrt{2.54}\right]} = 3.57 \text{ сек.}$$

Період власних коливань при кильовій хитавиці визначається за формулою [36]:

$$\tau_\varphi = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{1}{g} \cdot \frac{C_B}{C_W} \cdot d \cdot \left(1 + \frac{B}{(3 - 2 \cdot C_W) \cdot (3 - C_W) \cdot d}\right)}, \quad (5.3)$$

де $C_B = 0.617$ – коефіцієнт загальної повноти;

$C_W = 0.628$ – коефіцієнт повноти ВВЛ;

$d = 1.30$ м – осадка судна;

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

$$\tau_{\phi} = 2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{\frac{1}{9,81} \cdot \frac{0,617}{0,628} \cdot 1,3 \cdot \left(1 + \frac{16,7}{(3-2 \cdot 0,628) \cdot (3-0,617) \cdot 1,30}\right)} = 4.58 \text{ сек.}$$

Період власних коливань при вертикальній хитавиці визначається за формулою [36]:

$$\tau_{\psi} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{1}{g} \cdot \frac{C_B}{C_w} \cdot d \cdot \left(1 + \frac{0,85 \cdot C_w \cdot B}{(3-2 \cdot C_w) \cdot (3-C_w) \cdot d}\right)}, \quad (5.4)$$

$$\tau_{\psi} = 2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{\frac{1}{9,81} \cdot \frac{0,617}{0,628} \cdot 1,3 \cdot \left(1 + \frac{0,85 \cdot 0,628 \cdot 5,30}{(3-2 \cdot 0,628) \cdot (3-0,617) \cdot 1,3}\right)} = 2.80 \text{ сек.}$$

5.2. Розрахунок ходовості судна

Ходовість – це здатність судна рухатися із заданою швидкістю під впливом рушійної сили, яка створюється судновими рушіями. Величина цієї сили визначається опором, який надає навколишнє середовище переміщенню судна. Величина сили опору залежить від головних розмірювань судна, форми його обводів, характеру і стану його обшивки, швидкості та режиму руху, від параметрів посадки судна та умов його експлуатації.

5.2.1. Розрахунок опору води руху судна. Розрахунок опору води руху судна за методом голландського дослідного басейну виконується на ПК за допомогою програми Delftship. Вихідними даними для програми є: головні розмірювання судна L, B, d у другому наближенні, коефіцієнти повноти C_B , C_M , C_w , кут входу вантажної ватерлінії, швидкість ходу. В розрахунках було прийнято значення швидкості судна більше від експлуатаційної на 5% для урахування збільшення опору води при поступовому обростанні підводної частини корпусу судна мікроорганізмами.

Таблица 5.1 Розрахунок опоры Delft Series

Delft Series ('98).

Сопrotивление в соответствии с Delft Series ('98)						
Скорость	Скорость	Номер Фруд	Фрикционное сопротивление	Остаточная устойчивость	Полное сопротивление	Эффективная мощность
kn	m/sec		kN	kN	kN	кВт
0,00	0,00	0,000	0,0000	8,5916	8,5916	0,00
1,00	0,51	0,039	0,0258	4,4894	4,5152	2,32
2,00	1,03	0,077	0,0914	0,3871	0,4785	0,49
3,00	1,54	0,116	0,1920	0,0000	0,1920	0,30
4,00	2,06	0,154	0,3255	0,0000	0,3255	0,67
5,00	2,57	0,193	0,4906	0,0000	0,4906	1,26
6,00	3,09	0,231	0,6863	0,0000	0,6863	2,12
7,00	3,60	0,270	0,9119	0,0000	0,9119	3,28
8,00	4,12	0,308	1,1667	0,0000	1,1667	4,80
9,00	4,63	0,347	1,4503	4,6070	6,0572	28,04
10,00	5,14	0,385	1,7620	23,5665	25,3285	130,30
11,00	5,66	0,424	2,1016	25,7138	27,8154	157,40
12,00	6,17	0,463	2,4687	46,4517	48,9205	302,00
13,00	6,69	0,501	2,8630	124,0186	126,8816	848,56
14,00	7,20	0,540	3,2842	113,0506	116,3348	837,87
15,00	7,72	0,578	3,7320	61,0069	64,7389	499,57

Таблица 5.2 Розрахунок опоры John Winters

John Winters (KAPER).

Сопrotивление в соответствии с John Winters (KAPER)					
Скорость	Скорость	Номер Фруд	Фрикционное сопротивление	Остаточная устойчивость	Полное сопротивление
kn	m/sec		kN	kN	kN
0,00	0,000	0,000	0,0000	0,0000	0,0000
1,00	0,514	0,039	0,0242	0,0000	0,0242
2,00	1,029	0,077	0,0860	0,0000	0,0860
3,00	1,543	0,116	0,1810	0,0000	0,1810
4,00	2,058	0,154	0,3074	0,0000	0,3074
5,00	2,572	0,193	0,4638	0,0000	0,4638
6,00	3,087	0,231	0,6494	0,0000	0,6494
7,00	3,601	0,270	0,8634	0,0000	0,8634
8,00	4,116	0,308	1,1052	0,0000	1,1052
9,00	4,630	0,347	1,3745	0,0000	1,3745
10,00	5,144	0,385	1,6706	2,5414	4,2120

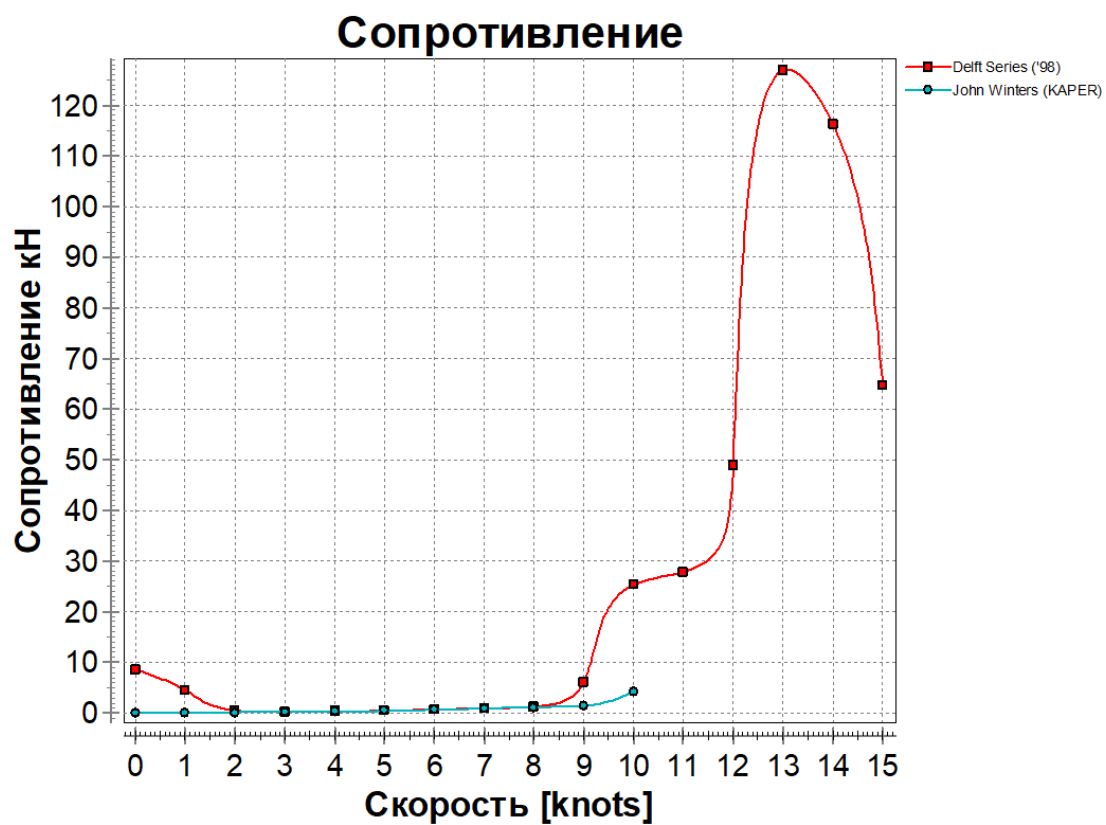


Рисунок 5.1 Графік розрахунку опору

РОЗДІЛ 6. СТИСЛА СПЕЦИФІКАЦІЯ СУДНА ЗА КОРПУСНОЮ ТА МЕХАНІЧНОЮ ЧАСТИНАМИ

6.1. Загальні відомості

Судно, що проєктується, — пасажирське малотоннажне судно, призначене для перевезення пасажирів на внутрішніх водних шляхах та у прибережних районах морів. Воно забезпечує комфортні та безпечні умови перевезення, включаючи можливість транспортування пасажирів з обмеженою мобільністю.

Архітектурно-конструктивний тип судна:

Самохідне, однопалубне, двогвинтове, виготовлене зі сталі морського застосування. Корпус — з обводами, оптимізованими для експлуатації на мілководді та забезпечення мінімального хвилювання. Судно належить до класу малого пасажирського флоту та відповідає вимогам Регістру судноплавства України щодо району плавання В2 — на внутрішніх водних шляхах.

Корпус — однокорпусний, з водонепроникними перегородками, що утворюють ізольовані відсіки та забезпечують непотоплюваність судна при затопленні будь-якого одного відсіку. Конструкція включає дві палуби: основну палубу пасажирського салону та верхню палубу з відкритими місцями для пасажирів, рятувальними засобами та навігаційним обладнанням. Кормова частина формує платформу для посадки/висадки пасажирів та евакуації.

Судно має рульову рубку з круговою оглядовістю, розташовану на верхній палубі. У кормовій частині передбачені технічні приміщення, машинне відділення та відсіки для паливних танків. Розміщення обладнання забезпечує простоту доступу при обслуговуванні та ремонті.

Конструкція корпусу проєктована відповідно до поперечної системи набору. Розрахунок елементів конструкції виконано відповідно до вимог класифікаційного товариства з урахуванням впливу гідродинамічних та експлуатаційних навантажень.

Непотоплюваність судна забезпечується водонепроникністю зовнішнього корпусу, перегородок та наявністю аварійних відсіків.

Основні технічні характеристики

- Довжина на ПП: 22 м
- Ширина габаритна: 5.30 м
- Осадка: 1.30 м
- Матеріал корпусу: сталь категорії А
- Пасажиромісткість: до 60 осіб
- Екіпаж: 4 особи
- Тип рушія: ВРК
- Швидкість ходу: 20 вузлів
- Дальність плавання: до 400 миль
- Автономність: 1–3 доби

Судно обладнане навігаційними системами та засобами зв'язку, включаючи радіостанції УКХ-діапазону, радіолокаційний комплекс, GPS-навігацію та систему AIS. Усі рятувальні засоби та обладнання відповідають міжнародним нормам безпеки та вимогам Регістру.

Суднові системи включають:

- системи прісної та технічної води
- вентиляцію пасажирських приміщень
- систему кондиціонування
- пожежну систему та системи аварійного осушення
- систему збору стічних вод

Для підвищення комфорту пасажирів передбачено герметичні вікна, шумо- та віброізоляцію, сучасні пасажирські сидіння, санітарні вузли та майданчики для розміщення багажу та колясок.

РОЗДІЛ 7. ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ ГІБРИДНИХ УСТАНОВОК НА СУДНІ

Морський транспорт становить значну частку світової торгівлі — від 80% до 90% обсягу обміну товарами здійснюється за допомогою суден. Висока енергоефективність морського транспорту порівняно з автомобільним та авіаційним є однією з основних причин його широкого використання. Однак це також призвело до того, що міжнародний морський транспорт став найбільшим споживачем палива в транспортному секторі, причому судна щорічно споживають близько 300 млн тонн викопного палива, за даними Міжнародної морської організації (ІМО).

Таке високе споживання призводить до значних обсягів викидів, оскільки викопне паливо є основою суднової енергетики. Важке паливо (HFO) становить приблизно 72% споживання, морське дизельне паливо — 26%, а зріджений природний газ (LNG) — лише 2%. Хоча LNG забезпечує вищу енергоефективність і зменшення викидів парникових газів (GHG) порівняно з HFO та дизельним паливом, його використання обмежене випаровуванням метану та технічними складнощами, пов'язаними зі зберіганням на судах. Дослідження показали, що LNG може зменшити викиди сірчистих оксидів (SO_x) на 98%, оксидів азоту (NO_x) на 86% та вуглекислого газу (CO₂) на 11% порівняно з HFO [4].

Згідно з Четвертим дослідженням ІМО щодо парникових газів (2020), загальний морський трафік (міжнародний, внутрішній та рибальський флот) викинув близько 1076 млн тон парникових газів, що на 9,6% більше порівняно з 2012 роком. Крім того, за даними Європейського агентства з довкілля (EEA), морський сектор у 2019 році був відповідальним за значні частки загальних викидів забруднюючих речовин: 1,94% оксиду вуглецю (CO), 20,98% оксидів азоту (NO_x), 11,80% сірчистих оксидів (SO_x) та 13,2% твердих часток (PM).

З огляду на всі ці фактори, Міжнародна морська організація (ІМО) протягом багатьох років впроваджує різні регуляторні заходи, такі як Індекс енергоефективності проектування судна (EEDI), Конвенція MARPOL щодо запобігання забрудненню з суден та План управління енергоефективністю суден (SEEMP), з метою максимально можливого обмеження викидів парникових газів. Хронологія найважливіших заходів і план ІМО до 2050 року наведена на рисунку 7.1.

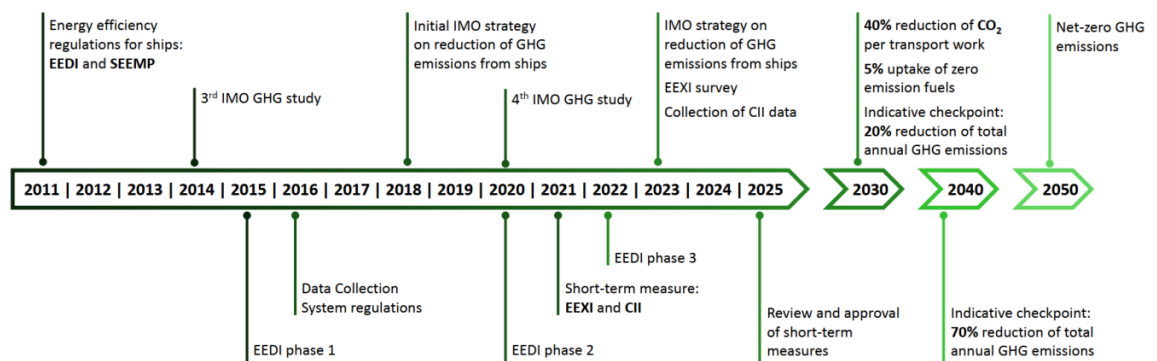


Рисунок 7.1 Хронологія найважливіших заходів і планів ІМО до 2050 року

Основні компоненти гібридних суднових енергетичних систем

Для того щоб підкреслити еволюцію гібридних електричних енергетичних систем на суднах, у цьому розділі коротко представлено історію розвитку суднового електричного та гібридного руху. На рисунку 2 наведено хронологію ключових подій у розвитку систем гібридної енергетичної установки.

Vandal, перше дизель-електричне судно, було побудоване у 1903 році, а в 1912 році військове судно USS Jupiter, перше з електричною рушійною установкою, було введене до складу військово-морських сил [30]. Jupiter був оснащений трьома рушійними системами: прямою паровою турбіною, турбоелектричною установкою та дизельною установкою. Його двоконтурна турбоелектрична рушійна система потужністю 3500 к.с. виявилася дуже ефективною.

Наприкінці XIX — початку XX століття впровадження електродвигунів змінного струму (AC), трансформаторів та дизельних двигунів сприяло

подальшому розвитку використання електроенергії на судах. Пасажирське судно SS Canberra, яке застосовувало електричний привід на змінному струмі (AC), було побудовано у 1960-х роках, а електродвигуни змінного струму почали активно розроблятися і впроваджуватися в 1970-х роках.

Розвиток електронних технологій під час енергетичної кризи 1970-х років сприяв переходу до ери повністю електричних суден. Спеціалізовані комерційні судна, такі як танкери для перевезення зрідженого природного газу (LNG), суттєво вплинули на проєктування електроенергетичних систем. Перехід від парових двигунів до двигунів внутрішнього згоряння став значним технологічним стрибком, який визначив подальший розвиток потужності та технологій судових рушійних систем.

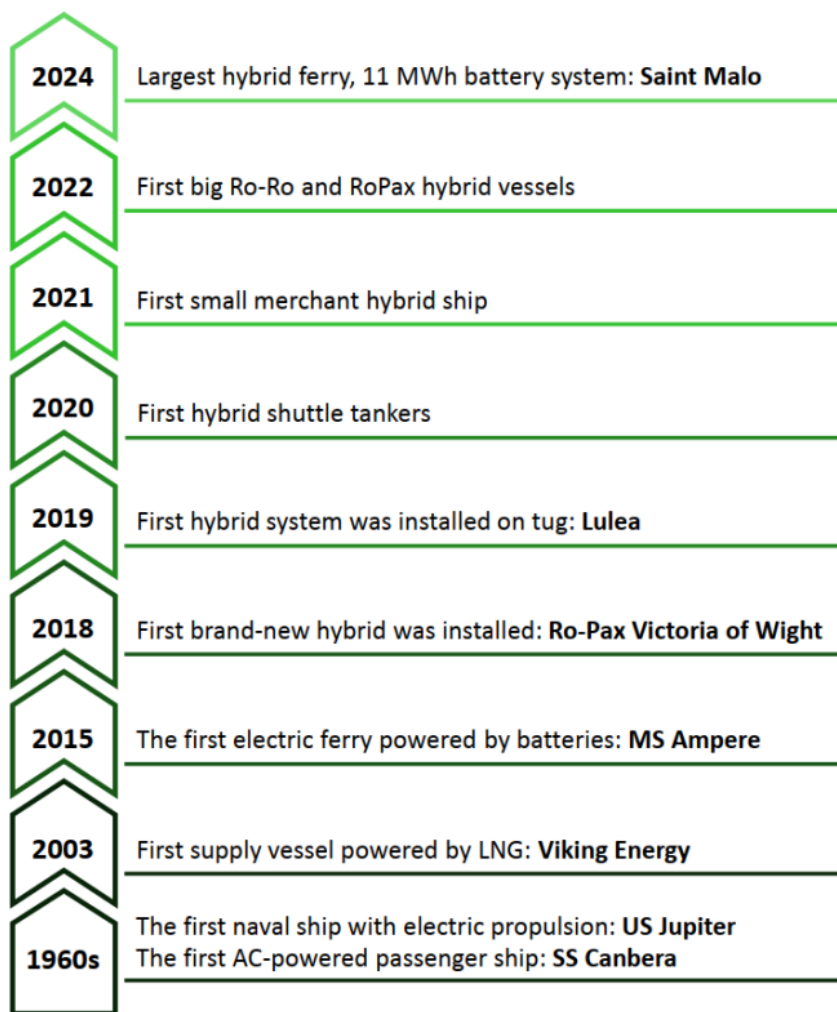


Рисунок 7.2 Хронологія використання гібридних установок

Акумуляторні батареї

Акумуляторні батареї сьогодні є провідною технологією для зберігання енергії завдяки їх високій питомій енергетичній щільності у порівнянні з іншими системами накопичення енергії, нижчій вартості відносно інших технологій аналогічного енергетичного рівня та значному досвіду їх застосування в інших транспортних секторах. Конструктивно батареї складаються з електродів, електролітів та сепараторів, і їхня ефективність значною мірою залежить від матеріалів електродів.

З огляду на різноманітність типів батарей, доступних для комерційного використання в транспортній галузі, вибір відповідного типу батареї є ключовим етапом для морської індустрії з метою забезпечення надійного, ефективного та оптимального впровадження систем накопичення енергії. Наразі, згідно з аналізами систем накопичення енергії (ESS), літій-іонні батареї вважаються найбільш придатними для морського сектору через їх високу щільність енергії, тривалий термін служби (високу циклічність), високий рівень технологічної зрілості та доступність. Крім того, ціна на літій-іонні батареї значно знизилася в останні роки, що додатково підвищило їх привабливість.

У роботі були детально проаналізовані характеристики кількох типів акумуляторів і зроблено такі висновки:

- Свинцево-кислотні батареї: низька енергетична щільність (30–50 Вт·год/кг); короткий або середній термін служби (500–1000 циклів); низька капітальна вартість (близько 70 USD/кВт·год). Через великі габарити менш придатні для суден, де простір є обмеженим.

- Нікель-кадмієві (NiCd) батареї: низька або середня щільність енергії (50–75 Вт·год/кг); тривалий термін служби (2000–2500 циклів); низька ефективність (60–65%); висока капітальна вартість (≈ 300 USD/кВт·год). Підходять для застосувань з невисокими енергетичними потребами.

- Нікель-металогідридні (NiMH) батареї: середня щільність енергії (60–100 Вт·год/кг); середній термін служби (≈ 750 циклів); висока вартість (300–500 USD/кВт·год). Можуть бути варіантом для суден зі середніми потребами в енергії, проте характеризуються високим саморозрядом — до 28%.

- Літій-іонні батареї: висока енергетична щільність (100–200 Вт·год/кг); висока ефективність (85–90%); висока капітальна вартість (200–700 USD/кВт·год). Незважаючи на більшу вартість порівняно з іншими технологіями, їхній тривалий термін служби та високі показники виправдовують витрати і роблять їх найкращим вибором для гібридних суден.

Акумуляторні батареї є відмінним рішенням для гібридизації суднових систем, і вже було проведено низку аналізів із використанням різних стратегій. Наприклад, для прибережних суден було розглянуто гібридну систему, що складається з літій-іонних батарей і паливних елементів, з оцінкою її доцільності та потенційних переваг на основі таких факторів, як потужність, енергетична щільність, термін служби та вартість.

Батареї в складі гібридних енергетичних систем на судах забезпечують економію палива, зниження викидів, підвищення надійності та зменшення витрат на обслуговування, що робить їх ключовою технологією для підвищення ефективності та екологічної стійкості судноплавства. Хоча існують певні виклики, зокрема щодо енергетичної щільності, вартості та інфраструктури заряджання, розвиток акумуляторних технологій робить їх все більш придатним рішенням для різних типів суден.

Крім того, аналіз гібридної системи батарея–дизель–електрична установка показав можливість скорочення викидів парникових газів на 14% у глобальному флоті балкерів. Водночас реалізуються проєкти повністю електричної суднової енергетики, такі як пором MF Ampere, який вважається важливим кроком до суден із нульовими викидами. Цей проєкт став важливою віхою у розвитку повністю електричних поромів — MF Ampere перебуває на експлуатації в

Норвегії з 2015 року. Судно оснащено NMC-батареями ємністю 1 МВт·год. Заряджання здійснюється від берегової мережі під час коротких стоянок у портах та вночі.

Двигун внутрішнього згоряння

Поширеним способом виробництва енергії на судах, як для рухової установки, так і для електричних потреб, є двигуни внутрішнього згоряння. Основними перевагами морських дизельних двигунів є значний досвід їх експлуатації, відомі операційні процедури, легка доступність запасних частин та розвинена глобальна мережа постачання палива. Високі інвестиційні витрати на технології зменшення викидів у порівнянні з тривалістю служби судна та обмежені запаси викопного палива роблять альтернативні види палива та гібридний рух привабливими рішеннями [49,50].

Дизельні двигуни показують знижену ефективність при часткових навантаженнях, оскільки в таких умовах вони спроектовані для споживання більшої кількості палива на одиницю виробленої енергії, ніж при роботі на оптимальних навантаженнях. Це означає, що двигуни замість підтримання стабільного рівня споживання палива відносно виконаної роботи, витрачають додаткові ресурси для забезпечення стабільної роботи. Ця втрата ефективності призводить до збільшення шкідливих викидів, що суперечить все більш суворим екологічним стандартам, встановленим міжнародними організаціями, такими як ІМО.

Враховуючи важливість зменшення викидів для дотримання регламентів та підтримки конкурентоспроможності на ринку, скорочення споживання палива стає пріоритетним завданням у судноплавній промисловості. Тому виробники рекомендують експлуатувати дизельні двигуни при навантаженнях понад 60% від їх максимальної безперервної потужності [30], оскільки саме в цьому діапазоні вони досягають оптимальної ефективності з точки зору споживання палива та викидів.

Однак морські умови вимагають змінних навантажень, особливо під час швартування, маневрування та відходу, коли часто потрібні менші або нерегулярні рівні потужності. Для зменшення неефективності двигунів за таких умов були розроблені системи збереження енергії, такі як батареї та суперконденсатори. Ці системи дозволяють дизельним двигунам працювати при більш постійному навантаженні, щоб надлишкова вироблена енергія могла зберігатися під час низького навантаження і використовуватися пізніше, коли попит на енергію зростає. Таким чином, дизельні двигуни підтримують більш оптимальний режим роботи, зменшуючи споживання палива та викиди, що сприяє більшій екологічній стійкості суден та ефективнішому дотриманню ринкових стандартів.

РОЗДІЛ 8. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ. РОЗРАХУНОК ПОБУДОВНОЇ ВАРТОСТІ СУДНА

8.1. Основні положення

Після завершення розрахунків основних характеристик проектного судна обчислюються економічні показники судна, як правило, у якості додатків витрат, які у завданнях проектування суден традиційно представляються у вигляді суми витрат (вартості) на проектування, будівництво, експлуатацію й утилізацію судна.

У загальному виді вартість будівництва судна повинна відбивати сукупні витрати суспільної праці на його виробництво, включаючи витрати галузі (собівартість) і вартісний еквівалент додаткового продукту. Вже на початковій стадії проектування при виборі основних елементів судна дуже важливо встановити вартість побудови кожного варіанту, оскільки вона визначає розміри капіталовкладень і витрати на поточний і середній ремонт, впливає на річні експлуатаційні витрати й інші економічні показники. Вартість будівництва судна може бути визначена різними методами. У практиці економічних розрахунків на морському транспорті використовують один з наступних способів:

- визначення вартості будівництва за групами конструктивного розбиття; звичайно приймають стандартне розбиття водотоннажності порожнем й встановлюють для кожної групи свої статистичні нормативи;
- укрупнений спосіб розрахунків вартості будівництва за допомогою розбиття на елементи;
- складання кошторисної калькуляції, у яку включають такі статті витрат, як матеріали, контрагентські постачання, заробітна плата, податки, накладні та інші витрати.

Перший метод в основному використовується на початкових стадіях проектування і при виконанні різноманітних науково-дослідницьких робіт.

Другий метод застосовується при складанні попередньої калькуляції для технічних проектів, а третій - при складанні кошторису за робочими кресленнями.

Метод розрахунків вартості побудови судна за групами конструктивного розбиття є одним з основним наближених методів. При розрахунках за цим методом у якості вихідних характеристик ухвалюють масу окремих конструктивних груп судна. Вартість будівництва за кожною із груп розбиття визначається на основі даних про масу конструкції і вартості однієї одиниці маси, встановленої за аналогічним або близьким по типу судном. Внаслідок простоти й можливості швидкого визначення будівельної вартості за великою кількістю варіантів цей спосіб широко застосовується при економічних обґрунтуваннях.

Для більш точного наближеного визначення вартості будівництва суден, коли немає можливості виконати диференційований розрахунок навантаження мас за групами конструктивного розбиття, використовують нормативи вартості та тони водотоннажності, одиниці потужності головної енергетичної установки, а також різноманітні емпіричні залежності. Серед відомих емпіричних методів найбільше застосування одержали параметричні методи, у яких вартість судна розраховується через його основні параметри.

8.2. Розрахунок побудовної вартості судна

8.2.1. Розрахунок побудовної вартості судна (K_c) виконується за залежністю [32]:

$$K_c = (K_{ко} + K_{гд} + K_{мо}) \cdot \mu \cdot \mu_l,$$

де $K_{ко} = k_{ко} \cdot D_{пор}$ - вартість корпусу з обладнанням, млн. грн;

$K_{гд}$ - вартість головного двигуна;

$K_{мо}$ - вартість механічного обладнання;

μ - коефіцієнт, що враховує інші витрати при побудові судна;

μ_l - поправний коефіцієнт, який залежить від льодової категорії судна

Вимірник $k_{ко} = f(D_{пор})$ для суховантажних суден дорівнює [32]:

$$k_{ко} = 0,575;$$

$$K_{ГД} = k_{ГД} \cdot N_{ВП}, \text{ грн.}$$

де $N_{ВП}$ - потужність головного двигуна, кВт.

$$\text{Вимірник } k_{ГД} = 182 \cdot N_{ВП}^{-0,25} \text{ грн/кВт } (N_{ВП}, \text{ тис. кВт});$$

$$K_{МО} = K_{МО} \cdot N_{ВП} \text{ грн. } (N_{ВП}, \text{ кВт}).$$

$$\text{Вимірник } k_{МО} = 408 \cdot N_{ВП}^{0,4} \text{ грн/кВт } (N_{ВП}, \text{ тис. кВт}).$$

$$\text{Значення } \mu = 1,3 D_{пор}^{-0,03} - \text{ для суховантажних суден } (D_{пор}, \text{ тис. т}).$$

Значення коефіцієнта μ_L залежить від льодової категорії судна; для судна, що проектується, $\mu_L = 1,0$.

9.2.2. Розрахунок елементів рейсу. Час (тривалість) рейсу T_p складається з ходового T_x і стоянкового $T_{ст}$ часу:

$$T_p = T_x + T_{ст}.$$

Ходовий час рейсу без заходу в проміжні порти визначається як:

$$T_x = Z / 24 v_e, \text{ діб}$$

де Z - довжина кругового рейсу, милі;

v_e - експлуатаційна швидкість ходу, вуз.

Стоянковий час дорівнює загальному часу перебування судна в обох портах. У порту відправлення судно приймає вантаж, а в порту призначення вивантажує його, а потім приймає вантаж для зворотного рейсу, який вивантажує у порту відправлення. Стоянковий час визначається як:

$$T_{ст} = \sum \frac{(P_e)_i}{(p_z)_i \cdot (M_{вал})} \text{ діб},$$

де $(P_v)_i = \alpha_i \cdot P_v$ - кількість вантажу, що завантажується і вивантажується в портах;

$P_{\text{с}}$ - вантажопідйомність судна;

α - коефіцієнт завантаження судна в прямому і зворотному рейсах (100%);

($M_{\text{вал}}$) - валові норми вантажних робіт з урахуванням простоїв, бункерування, оформлення документів, швартування, закріплення вантажу тощо, т/зміну.

Робота може виконуватися в одну, дві або три зміни на добу n_z , тоді:

$$(T_{\text{ст}})_i = (P_{\text{в}})_i / (n_z) \cdot (M_{\text{вал}})_i \text{ діб.}$$

Визначення кількості рейсів за навігацію: $n_p = T_{\text{с}} / T_p$ одиниць,

де $T_{\text{с}}$ - експлуатаційний період, діб (за завданням);

T_p - тривалість кругового рейсу, діб.

Провозоспроможність одного судна за навігаційний період $Q^{\text{рік}} = P_{\text{в}}^p \cdot n_p$

де $P_{\text{в}}^p$ - кількість вантажу, який перевезено за круговий рейс, т.

8.3. Розрахунок експлуатаційних і питомих зведених витрат

Враховуючи, що мінімальні витрати від експлуатації судна є одним з основних економічних критеріїв, розглянемо як вони визначаються.

8.3.1. Визначення експлуатаційних витрат C . Вони складаються з трьох частин: постійних витрат C_1 , які розраховуються одразу за весь навігаційний період, витрат на паливо і мастило на ходу C_2 та витрат на стоянці в портах C_3 , які визначаються за кожний круговий рейс.

Розрахунок постійних річних витрат здійснюється як:

$$C_1 = S_1 + S_2 + S_3,$$

де S_1 - утримання екіпажу (з накладними витратами);

S_2 - амортизаційні відрахування, витрати на ремонт і забезпечення;

S_3 - навігаційні витрати (на питну воду, на дегазацію, дезінфекцію, технічний огляд судна, придбання навігаційних карт, лоцій, інструментів, оплати буксирів, криголамів, портових зборів та ін.).

У свою чергу $S_1 = s_1 \cdot n_{ек} \cdot T_e$, грн. де $s_1 = 300$ грн. (на суховантажних суднах)
- витрати на утримання 1 представника екіпажу;

$n_{ек}$ - кількість екіпажу; T_e - експлуатаційний період, діб (332 доби).

Амортизаційні відрахування: $S_2 = s_2 \cdot K_{ср.с.}$,

де $K_{ср.с.}$ - середньосерійна вартість судна, млн. грн.;

$s_2 = 0,06$ (для суховантажних суден) - норматив амортизаційних відрахувань.

Навігаційні витрати: $S_3 = s_3 \cdot T_e$, грн., де s_3 - питомі навігаційні витрати, грн/добу.

Для пасажирських суден:

$$s_3 = 62,6 + 4,229DW - 0,0482DW^2 + 0,0002267DW^3,$$

де DW - дедвейт судна, тис. т.

Витрати на паливо і мастило на ходу за рейс визначаються за виразом:

$$C_2 = T_x \cdot \omega_n \cdot (P_n^{\text{доб}})_x, \text{ грн.}$$

де T_x - сумарний ходовий час за рейс, діб;

ω_n - вартість однієї тони палива і мастила, грн./т;

$(P_n^{\text{доб}})_x = 24k_{мз} \cdot q_n \cdot Ne \cdot 10^{-6}$ - добові витрати палива і мастила на ходу судна, т/добу;

Ne - потужність головного двигуна, кВт;

q_n - питомі витрати палива і мастила на ходу судна на всі потреби, г/(кВт·год); для двигунів типу МОД $q_n = 190$ г/(кВт·год).

$k_{мз} = 1,1 \dots 1,15$ - коефіцієнт морського запасу.

Визначення витрат на паливо і мастило на стоянках за круговий рейс виконується за формулою: $C_3 = \omega_n (P_n^{доб})_{cm} T_{cm}$, грн.

де $T_{ст} = T'_{cm} + T''_{cm}$ - час, що складається зі стоянкового часу судна з вантажними операціями T'_{cm} , тобто часу, коли працюють судові крани або насоси, і стоянкового часу судна без вантажних операцій T''_{cm} , коли вантажні операції виконуються вантажними засобами порту.

Відповідно до цього розрізняють добову витрату палива і мастила на стоянці з вантажними операціями $(P_n^{доб})_{cm}'$ і без вантажних операцій $(P_n^{доб})_{cm}''$, які визначаються в частках від $(P_n^{доб})_x$.

$$(P_n^{доб})_{cm}' = \chi_1 (P_n^{доб})_x; \quad (P_n^{доб})_{cm}'' = \chi_2 (P_n^{доб})_x;$$

Значення χ_1 і χ_2 знаходяться за залежностями:

- для суховантажних суден на стоянці з вантажними операціями:

$$\chi_1 = 0,27997 - 0,042987Ne + 0,003474Ne - 0,000126566Ne^3;$$

- для суховантажних і наливних на стоянці без вантажних операцій:

$$\chi_2 = 0,2654 - 0,04609Ne + 0,0038069Ne^2 - 0,0001377Ne^3,$$

де Ne - потужність головного двигуна, тис. к. с.

Таким чином розрахунковий вираз для C_3 набуває такого вигляду:

$$C_3 = \omega_n [(P_n^{доб})_{cm}' T'_{cm} + (P_n^{доб})_{cm}'' T''_{cm}] \text{ грн.}$$

11.3.2. Розрахунок оборотних коштів у вантажах і питомих зведених витратах виконується за залежністю: $K_e = k_e \cdot Q_e^{pik}$, грн, де через k_e позначені оборотні кошти, які припадають на 1 т вантажу за час його доставки, грн/т;

Q_e^{pik} - загальна кількість вантажу, яка перевезена судном за навігацію, т.

Вимірник k_{ϵ} (питомі оборотні кошти) визначається як: $k_{\epsilon} = \frac{C_v \cdot T_{\epsilon}}{365}$, де C_v - ціна 1 т перевезеного вантажу за навігацію, грн/т;

T_{ϵ} - сумарний час доставки вантажу за навігацію, діб.

Для суховантажних суден $T_v = (T_x + 0,5T_{ст}) \cdot n_p$.

Питомі зведені витрати на транспортування тонни вантажу, що перевозиться, з урахуванням капітальних вкладень та оборотних коштів у вантажах розраховуються таким чином:

$$Z_n = \frac{C + E_1 K_{ср.с} + E_2 K_{\epsilon}}{Q_{\epsilon}^{рік}} \text{ грн/т}$$

де $E_1 = 0,15$ і $E_2 = 0,12$ - нормативні коефіцієнти ефективності капітальних вкладень та оборотних коштів у вантажах. Всі розрахунки зведені в таблицю.

Таблиця 8.1 Розрахунок побудовної вартості

Показник	Значення	Одиниці
Тип судна	Пасажирське	-
Довжина корпусу	21.50	m
Макс. довжина (LOA)	22.00	m
Пасажири	60	осіб
Двигуни	2 × 450	kW
Сумарна потужність головна	900	kW
SFC головного двигуна	200	g/(kW·год)
SFC (т/kW·год) головн.	0.00020	t/(kW·год)
Hotel потужність (припущення)	150	kW
SFC генератора	210	g/(kW·год)
SFC (т/kW·год) aux	0.00021	t/(kW·год)
Споживання головних двигунів	0.18000	t/год
Споживання hotel	0.03150	t/год
Загальне споживання палива	0.21150	t/год
Швидкість	20	kn
Відстань між портами	450	nm
Час проходження (1-кін)	22.50	год
Паливо на рейс (1-кін)	4.75875	t
Паливо на круговий рейс	9.51750	t
Операційні години (332 дні)	7 968	год

Річне споживання палива	1 685.232	t
Ціна палива	12 500	грн/т
Вартість палива на рейс (1-кін)	59 484.38	грн
Вартість палива на круговий рейс	118 968.75	грн
Річна вартість палива	21 065 400.00	грн
Паливо на 1 нм	0.010575	t/nm
Паливо на 1 нм	10.575	kg/nm
Вартість палива на 1 нм	132.19	грн/nm
Вартість палива на 1 пасажир (1-кін)	991.41	грн/пасажир

ВИСНОВКИ

Відповідно до завдання на магістерську роботу було спроектовано пасажирське судно, призначення якого – перевезення 60 пасажирів на прибережних маршрутах та внутрішніх водних шляхах протяжністю до 450 морських миль. Судно призначене для експлуатації у теплих і помірних кліматичних районах, має високі показники комфортності та безпеки для пасажирів.

Морехідні якості судна — остійність, непотоплюваність і міцність корпусу — у всіх розрахункових та експлуатаційних випадках завантаження відповідають вимогам Регістру судноплавства України (РСУ) згідно з класом судна.

Архітектурно-конструктивний тип судна: самохідне, двогвинтове, з пасажирським салоном на головній палубі та відкритою верхньою палубою для прогулянок. Корпус має суцільнозварну конструкцію з морської сталі, подвійне дно в машинному відділенні та водонепроникні перегородки, що забезпечують необхідну живучість судна при можливих аварійних ситуаціях.

У кормовій частині розміщено машинне відділення з двома головними дизельними двигунами потужністю по 450 кВт кожен, які забезпечують швидкість 20 вузлів. Судно має допоміжний дизель-генератор потужністю 150 кВт для забезпечення електроспоживачів і систем життєзабезпечення. Автономність за запасами палива, води та провізії складає до 2 діб, що відповідає вимогам для прибережних і каботажних перевезень.

Основні розміри судна становлять:

- Довжина найбільша _____ $L_{max} = 22,00 \text{ м}$
- Ширина _____ $B = 5,70 \text{ м}$
- Висота борту _____ $D = 2,80 \text{ м}$
- Осадка _____ $d = 1,20 \text{ м}$
- Пасажиромісткість _____ 60 осіб

- Потужність головних двигунів _____ $2 \times 450 \text{ кВт}$
- Автономність плавання _____ 2 доби

Проведені розрахунки підтвердили, що судно має достатні запаси міцності та остійності, відповідає вимогам щодо живучості, енергетичної ефективності та стабільності на курсі. Паливна ефективність судна становить близько 0,21 т палива/год, що забезпечує низькі експлуатаційні витрати при збереженні необхідної швидкості руху.

Порівняно з близькими за призначенням прототипами, розроблене судно має полегшену конструкцію корпусу, зменшене споживання палива та підвищений рівень комфортності для пасажирів. Використання алюмінієвого корпусу дозволяє знизити вагу судна, збільшити корисне навантаження та підвищити довговічність конструкцій.

Судно проєктується на клас КЕ В2 «пасажирське судно» під наглядом Регістру судноплавства України. Район плавання – прибережний, категорія «річка–море». Отже, проєкт пасажирського судна повністю задовольняє вимоги завдання на магістерську роботу, а також норми і правила РСУ. Судно забезпечує необхідний рівень безпеки, економічності та зручності експлуатації, що дозволяє рекомендувати його для подальшої реалізації у виробництві.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кротов О. І., Голіков В. І., Єганов О. Ю., Бондаренко О. В. Проектування морських транспортних суден : Навчальний посібник. Миколаїв : УДМТУ, 2003. 156 с.
2. Правила класифікації та побудови морських суден. Регістр судноплавства України. Київ : Регістр судноплавства України, 2020. Т.1. 53 с.
3. Правила про вантажну марку. Регістр судноплавства України. Київ : Регістр судноплавства України. 2020. 81 с.
4. Бондаренко О. В., Кротов О. І., Матвєєв Л. О., Прокудін С. О. Особливості проектування морських транспортних суден. Навчальний посібник. Миколаїв : НУК. 2007. Ч.3. 75 с.
5. Матвєєв В. Г., Кузнецов А. І., Мартинець Б. М., Михайлов Б. М., Узлов О.М., Цибенко М.О., Шарун Г. В. Проектування конструктивного мідель-шпангоута суховантажних суден. Методичні вказівки. Миколаїв : УДМТУ, 2002. 74 с.
6. Лугінін О. Є. Методичні рекомендації до розділу «Загальна та місцева міцність корпусу судна» в дипломному проектуванні. Херсон : ХФ НУК, 2013. 8 с.
7. Основи теорії пружності, будівельної механіки, міцності та вібрації суден : навч. посіб. / А. М. Сердюченко, О. Є. Лугінін, Р. Ю. Коршиков та ін. ; за ред. : А. М. Сердюченко ; Нац. ун-т кораблебудування ім. С. О. Макарова. Миколаїв : НУК, 2012. 422 с.
8. Зайцев, В.В. Якорно-швартовные устройства. Учебное пособие / В. В. Зайцев, А. Е. Еганов, Ю. Н. Коробанов, Э. В. Толышев, Вал. В. Зайцев. – Николаев : издательство ЧП «Шамрай», 2002. 163 с.
9. Технологія корпусобудівних робіт: Підручник / Рашковський О. С., Щедроносєв О. В., Фаріонов А. М., Цикало Н. В., Перов В. М., Сліжевський С. М.;

за заг. ред. проф. О.С. Рашковського (Рекомендовано Вченою радою НУК, протокол № 13 від 29.12.2017 р.). Миколаїв : НУК, 2018. 516 с.

10. Технологія виготовлення деталей корпусу судна : Навчальний посібник / О. С. Рашковський, С. І. Жигуліна, В. М. Перов, С. М. Сліжевський; Під заг. ред. проф. О. С. Рашковського. Миколаїв : НУК, 2009. 136 с.

11. Технологія виготовлення конструкцій корпусу судна : Підручник / О. С. Рашковський, В. М. Перов, С. М. Сліжевський, Н. В. Цикало; за заг. ред. проф. О. С. Рашковського (Рекомендовано Вченою радою НУК імені адмірала Макарова як підручник, протокол № 10 від 28.10.2016 р.). Миколаїв : НУК, 2017. 304 с.

12. Жигуліна С. І., Рашковський О. С., Фаріонов А. М. Технічне нормування праці в суднобудуванні. Методичні вказівки. Миколаїв : УДМТУ, 2003. 68 с.

13. Лісова І. Д. Проектування суден. Методичні вказівки щодо економічного обґрунтування дипломного проекту. Одеса : ОНМУ, 2005. 16 с.

14. Eyres D. J., Bruce G. J. Ship Construction / D. J. Eyres, G. J. Bruce. – 7th ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012. 368 p.

15. Lamb T. (ed.) Ship Design and Construction / Thomas Lamb (ed.). – Revised ed. Jersey City, NJ: Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), 2003–2004. 2 vol.

16. Storch R. L., Hammon C. P., Bunch H. M., Moore R. C. Ship Production / Richard Lee Storch, Colin P. Hammon, Howard M. Bunch, Richard C. Moore. 2nd ed. Cornell Maritime Press, 1995. 550 p.

17. Lewis E. V. (ed.) Principles of Naval Architecture Series [Text] / Edward V. Lewis (ed.). Jersey City, NJ: Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), 1988–1989. 3 vol.