

шпангоутної рами. Для підтвердження цього припущення було виконано розрахунки ізольованої шпангоутної рами та порівняно з результатами розрахунків просторового відсіку. Результати розрахунку за обома схемами виявилися досить близькими, що дозволило зробити висновок про застосування схеми ізольованої шпангоутної рами для розрахунків міцності корпусних конструкцій двохпалубних накатних суден без піллерсів.

Також для двохпалубного накатного судна без піллерсів була проведена оцінка можливості використання для визначення розмірів рамних зв'язків верхнього твіндека П-подібної рами шпангоутної, жорстко защемленої на рівні головної палуби. В результаті розрахунків було встановлено, що напруження у вузлі рамний бімс - рамний шпангоут біля верхньої палуби виявилися близькими до розрахунку просторового відсіку, а в рамному шпангоуті на рівні головної палуби при розрахунку П-подібної рами шпангоутної завищуються в порівнянні з відсіком приблизно на 10%.

Висновки. Запропоновано методику проектування рамних зв'язків накатних суден, що дозволяє суттєво скоротити витрати часу на підготовку вихідних даних для розрахункових схем. Використання розрахункової схеми на прикладі двохпалубного накатного без піллерсов показало можливість її практичного застосування у реальному проектуванні. Для таких суден доведено можливість використання розрахункових схем у вигляді ізольованих шпангоутних рам.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Правила класифікації та побудови морських суден. Том 2. Корпус. Регістр судноплавства України. Київ: РУ, 2020.
2. DNV GL rules for classification: Ships. DNV GL, 2017.

Title Of The Report: Calculation Models For Verifying The Strength Of Roll On –Roll Off Ships Hulls

Sharun Ryhorii

Admiral Makarov National university of shipbuilding

Abstract: Calculations of the local strength of the hulls of roll on-roll off ships have been performed. Recommendations have been developed for the use of transversal frames and spatial compartments for the hulls of roll on-roll off ships as calculation schemes.

Keywords: roll on-roll off ships; local strength; stressed and deformed state.

УДК 629.5.015

ВРАХУВАННЯ ЕКОНОМІЧНИХ ФАКТОРІВ ПРИ ОЦІНЮВАННІ ПОЗДОВЖНЬОЇ МІЦНОСТІ КОРПУСУ СУДНА

Щедролюсєв О. В.¹, Коновалова Г. В.², Бондарчук О. В.³

¹ доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Суднобудування та ремонту суден, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсонський навчально-науковий інститут, м. Миколаїв, Україна
aleksandr.schedrolovse@nuos.edu.ua

² здобувач PhD, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна konovalovaiianna@gmail.com

³ магістрант, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсонський навчально-науковий інститут, м. Миколаїв, Україна lehabond48@gmail.com

Анотація. а даний час відсутній комплексний підхід до оптимізації конструкцій корпусу судна, який поєднує у собі три описаних вище видів оптимізації та який дозволить із

використанням сучасних алгоритмів пошук оптимальних рішень, котрі неможливо знайти традиційними методами. Мета дослідження – розроблення та апробація методу розрахунку економічних показників при нормуванні поздовжньої міцності корпусу судна із використанням комплексного підходу оптимізації топології, розмірів та форми. В той же час запропонований апарат повинен бути максимально простим для користувача максимально незалежно від його рівня попередньої підготовки.

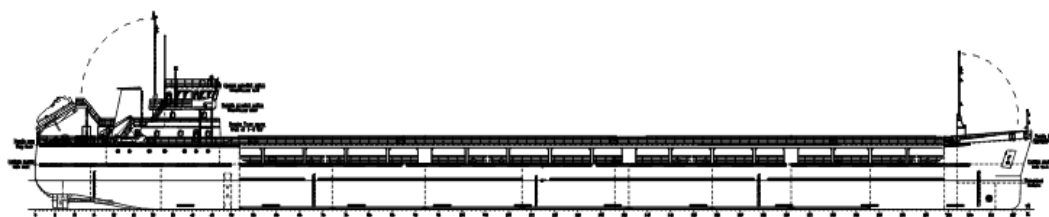
Ключові слова: поздовжня міцність суден, економічне обґрунтування, економічні показники, топологічна оптимізація.

Актуальність та постановка задачі дослідження. При створенні нового проєкта конструктор, як правило, орієнтується на найближчий прототип та виконує його перероблення під задані у технічному завданні експлуатаційні та функціональні характеристики. При такому підході знову отримані конструкції є у деякому ступені повторенням аналогів, які вже існують і більшість відмінностей носять локальний характер. Переваги традиційного підходу полягають у надійності отриманих проєктно-конструкторських рішень, які мають обґрунтування накопиченим багаторічним досвідом як конструювання, так і експлуатації суден. Недоліки полягають у необхідності мати той самий накопичений роками досвід, що робить неможливим виконання принципово нових проєктів. Також мала ймовірність появи проривних принципово нових рішень, які більш за все залежать від творчих здібностей самого конструктора. Ці фактори не дають змогу повноцінно оцінити економічні характеристики принципово нового проєкту під час конструювання для нього корпусних конструкцій та проведення розрахунків із забезпечення загальної міцності корпусу судна на ранніх стадіях проєктування. виправити перелічені недоліки у значній мірі можливо за допомогою створення математичного апарату, який забезпечить оцінювання економічних факторів при нормуванні поздовжньої міцності корпусу судна, яке проєктується.

Мета дослідження – розроблення та апробація методу розрахунку економічних показників при нормуванні поздовжньої міцності корпусу судна із використанням комплексного підходу оптимізації топології, розмірів та форми. В той же час запропонований апарат повинен бути максимально простим для користувача максимально незалежно від його рівня попередньої підготовки.

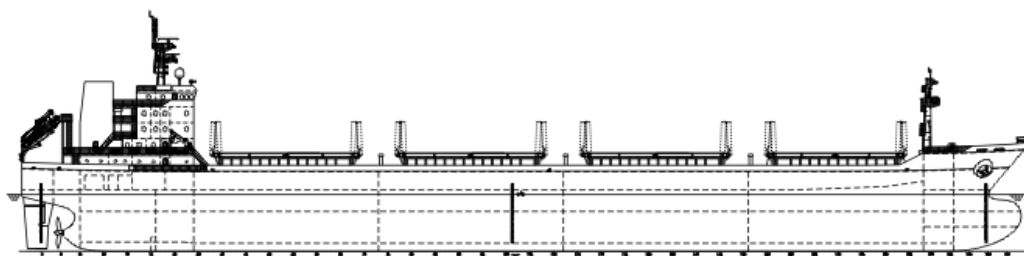
Основна частина. Розрахункові критерії та раціональні запаси міцності конструкцій корпусу судна у значній мірі визначаються економічними показниками. Надлишок міцності призводить до збільшення ваги корпусу, зростання його побудованої вартості, погіршення деяких експлуатаційних характеристик судна (ходовості, плавності бортової та кільової хитаючи, погіршення сходження на хвилю) та із зростанням окремих складових витрат на експлуатацію (витрати палива та мастила, збільшення часу переходу між портами, зменшення фактичної швидкості ходу, нераціональні режими експлуатації енергетичної установки тощо). З іншого боку при цьому знижуються витрати, які викликані пошкодженнями або руйнуваннями, необхідністю ремонту та виведення судна із експлуатації для виконання реноваційних робіт, або робіт з переобладнання, модернізації, утилізації.

Перш за все основними критеріями під час нормування міцності та оцінювання економічної ефективності судна є його головні розмірювання. Із досвіду нормування міцності на ранніх стадіях проєктування [12] відомо, що насамперед необхідно співставити відношення довжини, ширини та висоти борту судна (рис. 1). Для суден із значною довжиною у порівнянні з висотою борту це питання найактуальніше і навпаки: при відношенні $\frac{L}{D} < 8$ поздовжня міцність корпусу судна забезпечена автоматично при прийнятті мінімальних розмірів в'язей згідно рекомендацій класифікаційних товариств (рис. 1 б).



а) Суховантажне судно проєкту RSD31 дедвейтом 5755 тон

класу «Волго-Дон макс» ($L = 139,7$ м; $\frac{L}{B} = 8,48$; $\frac{B}{D} = 2,75$; $\frac{L}{D} = 23,2$)



б) Судно проєкту BC42 для перевезення навалювальних вантажів дедвейтом 22360 т

($L = 150$ м; $\frac{L}{B} = 6,25$; $\frac{B}{D} = 1,83$; $\frac{L}{D} = 11,43$)

L – довжина між перпендикулярами; B – ширина на міделі;
 D – висота борту

Рисунок – 1 Порівняння відношень головних розмірювань вантажних суден (ескізи та інформацію взято з сайту meb.com.ua)

Безпосередньо щодо нормування загальної поздовжньої міцності корпусу торговельного судна роль економічних факторів можна оцінити використовуючи функцію сумарних витрат на його побудову та експлуатацію. До цієї функції необхідно ввести усі складові, які математично залежать від міцності корпусу: витрати на побудову корпусу, які зростають із збільшенням параметрів міцності, а також дві групи витрат на експлуатацію (перша – зменшується із зниженням характеристик міцності, друга – зменшується із зростанням моменту опору та моменту інерції поперечних перетинів корпусу судна).

Витрати на створення корпусу морського транспортного судна складають приблизно 37% його вартості [13]. На поздовжні в'язі, які забезпечують загальну міцність, припадає приблизно 50% маси металевих корпусу і таким чином приблизно 19% коштовності судна. Маса поздовжніх в'язей змінюється пропорційно величині мінімального моменту опору

поперечного перетину корпусу в ступені $\frac{2}{3}$. Якщо вважати, що загальна міцність поздовжніх

в'язей включає в себе витрати на метал, його оброблення та накладні витрати і рахувати, що останні не залежать від маси металу, а лише від коштовності оброблення пропорційно масі матеріалів, то побудовна вартість судна C_C як функція від його відносного моменту опору може бути представлена як

$$C_C = C_0 \left(e + f \sqrt[3]{k^2} \right), \quad (1)$$

де C_0 – вартість базового судна; e та f – чисельні коефіцієнти у діапазоні 0,8...0,92 та 0,1 ... 0,15 відповідно, які залежать від типу судна; в розрахунках прийнято $e = 0,87$ та $f = 0,13$, як результат чисельного перерахунку характеристик суден проєктів RSD31 та BC42 [14]; k – відносний мінімальний момент опору судна у долях від моменту опору базового судна.

В той же час відомо, що збільшення вантажопідйомності при незмінних інших умовах

само собою призводить до збільшення економічної ефективності роботи судна [15]. Враховуючи це, більш об'єктивне оцінювання результату економії металу можна отримати, гадаючи, що усі варіанти які розглядаються для суден із різною вагою корпусу в рівних умовах задовольняють вимогам технічного завдання, в якому обмовляються визначені вантажопідйомність та швидкість ходу. В цьому випадку економічні наслідки змінення ваги корпусу будуть виражатися тільки через зміну витрат на пальне та мастило, що є наслідком змінення головних розмірювань, форми обводів, опору руху води і як наслідок, потрібної потужності головної силової установки.

Орієнтуючись на середні ціни, можна вважати що витрати на пальне за 20 років служби судна складає від 20 до 40% його побудованої вартості [16]. Надалі у відповідності із модифікованою формулою адміралтейських коефіцієнтів [16] прийнято, що потрібна для забезпечення заданої проєктної потужності пропорційна квадратному корню квадратному із повної об'ємної водотоннажності, тобто $N \sim \sqrt{V}$. Вважаючи вагу металевго корпусу приблизно рівною 30% від повної водотоннажності ∇ , а також, що на поздовжні в'язі припадає не більше 50% ваги металевго корпусу, можна стверджувати, що

$$\nabla = 0,85\nabla_0 + 0,15\nabla_0 k^{\frac{2}{3}},$$

де ∇_0 – об'ємна водотоннажність базового судна.

На закінчення приймаючи, що витрати пального пропорційні потужності головної силової установки, для вартості пального справедлива рівність

$$C_T \cong 0,3C_0 \sqrt{\frac{\nabla}{\nabla_0}} = 0,3C_0 \sqrt{0,85 + 0,15\sqrt[3]{k^2}}. \quad (2)$$

Витрати на експлуатацію другої групи пов'язані із ступенем ймовірності появи і характером відмов корпусних конструкцій. У якості відмов доцільно розглядати порушення граничної (руйнування) та втомленої (пошкодження) міцності. Перше можна ототожнювати у вартісному вираженні із втратою судна та вантажу, друге – із необхідністю тимчасового виведення судна із експлуатації для ремонту.

Наслідки, які пов'язані із руйнуванням корпусу, у вартісному вигляді можна представити залежністю

$$C_P = nC_0 p. \quad (3)$$

де n – коефіцієнт, який визначає збитки при загибелі судна, вантажу та враховує супутні наслідки (забруднення середовища, невиконання зобов'язань тощо); p – ймовірність руйнування корпусних конструкцій та загибелі судна.

Коефіцієнт n для суден різних типів змінюється у діапазоні 2 ... 4, а параметр p лежить у межах 10^{-4} ... 10^{-6} . На основі довгочасних розподілень хвильових навантажень в діапазоні їх екстремальних значень можна прийняти, що параметр p змінюється приблизно на один порядок пр. зміні моменту опору поперечного перетину в районі міделя на 10%. Цю залежність можна апроксимувати ступеневою функцією виду $p = p_0 k^{-22}$, де p_0 – ймовірність руйнування корпусу базового судна при $k = 1$.

Наслідки, які пов'язано із появленням у окремих вузлах втомлених тріщин, у вартісному відношенні можна оцінити, виходячи із наступних пропозицій. Коштовність ремонту пошкоджень із урахуванням втрат на вивід судна із експлуатації складає mC_0 ($m = 0,05 \dots 0,08$), а ймовірність виникнення пошкоджень всередньому для транспортних морських суден відповідає $q_0 = 0,1 \dots 0,25$ (таблиця 1). Тут і надалі p_0 – ймовірність істотного руйнування корпусу або загибелі судна (таблиця 1); q_0 – ймовірність виникнення пошкоджень для суден в середньому (таблиця 1).

Змінення q у залежності від відносного моменту опору, використовуючи рівняння, які

відомі для закономірності параметрів втомлених пошкоджень, можна представити у вигляді $q = q_0 k^{-5}$. Тоді вартість пошкоджень складатиме

$$C_n = mC_0(1-p)q. \quad (4)$$

Функцію сумарних витрат на побудову і експлуатацію судна, яка залежить від параметру k , представлено як суму, необхідну на побудову, паливе та витрат, які пов'язані із можливим руйнуванням та пошкодженням корпусу, тобто

Таблиця 1 – До визначення параметрів p_0 та q_0

Джерело	p_0	q_0
[6]	10^{-4}	-
[7]	$10^{-3} \dots 3 \cdot 10^{-5}$	0,10 ... 0,20
[8]	10^{-4}	0,25
[8]	10^{-4}	-
[9]	$10^{-5} \dots 6 \cdot 10^{-5}$	0,02 ... 0,08
[11]	-	0,20

$$C_{\Sigma} = C_C + C_T + C_P + C_{II}.$$

Використовуючи залежності (1) ... (4), рівняння для C_{Σ} у залежності від параметру k прийме вигляд

$$C_{\Sigma} = C_0 \left(e + f \sqrt[3]{k^2} \right) + 0,3C_0 \sqrt{0,85 + 0,15 \sqrt[3]{k^2}} + nC_0 p_0 k^{-22} + mC_0 (1-p) q_0 k^{-5}. \quad (5)$$

Переходячи до відносних витрат $\frac{C_{\Sigma}}{C_0}$, диференціюючи рівняння (5) по k , відкинувши малі другого порядку та прирівнявши до нуля, знайдено рівняння для визначення k , яке приводить до мінімуму $\frac{C_{\Sigma}}{C_0}$

$$W = 0,666fk^{-0,334} + 0,15 \frac{k^{-0,334}}{\sqrt{0,85 + 0,15 \sqrt[3]{k^2}}} - 22np_0 k^{-23} - 5mq_0 k^{-6} = 0. \quad (6)$$

Складові функції коштовності судна мають залежності

$$\left. \begin{aligned} A &= 0,666fk^{-0,334} - \text{конструктивна} \\ B &= 0,015k^{-0,334} \sqrt{0,85 + 0,15 \sqrt[3]{k^2}} - \text{паливе} \\ C &= 22np_0 k^{-23} - \text{руйнування} \\ D &= mq_0 k^{-6} - \text{пошкодження} \\ (A+B) &- \text{додатня частина} \\ (C+D) &- \text{від'ємна частина} \end{aligned} \right\}.$$

Розв'язок рівняння (6) виконано у режимі електронних таблиць MS Excel із використанням функції «пошук рішення» (таблиця 2) та перевірено графоаналітичним методом (рис. 2).

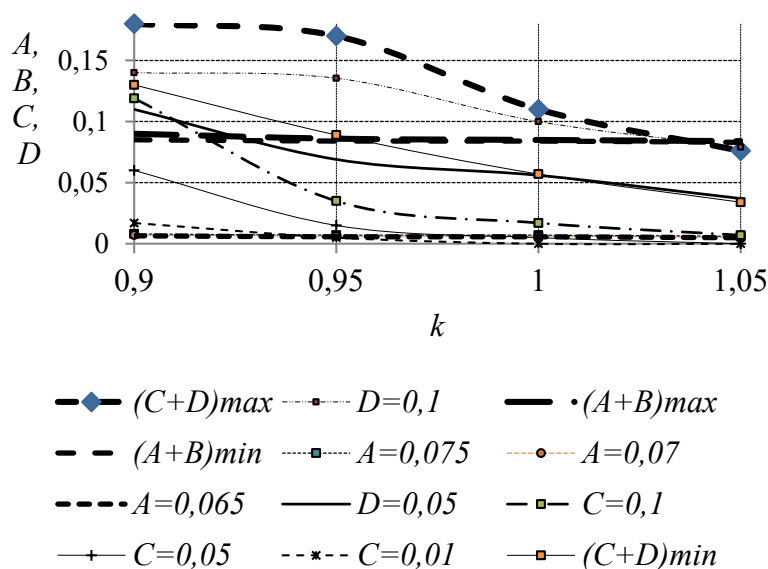


Рисунок – 2 Функції складових вартості судна (власні розробки авторів)

Таблиця – 2 Визначення мінімуму $\frac{C_{\Sigma}}{C_0}$ цільової функції (6)

	f	k	n	p	q	m	
	0,02	0,95	2,1	0,000	0,60	0,047	
$W=$	-0,06						
			Limits				
			0	<	f	<=	0,1
			0,8	<	k	<=	1
$A=$	0,014		2	<	n	<=	4
$B=$	0,153		$10^{(-5)}$	<	p	<=	$10^{(-4)}$
$C=$	-0,03		0,1	<	q	<=	0,8
$D=$	-0,19		0,05	<	m	<=	0,08

Аналіз результатів. Під час варіювання коефіцієнтів, які входять до отриманої цільової функції W (6) у реальних діапазонах їх змінення, зроблено наступне резюме. Утримання в цільовій функції (6) перших трьох членів, тобто урахуванні в групі витрат тільки тієї її частини, котра пов'язана із критерієм разового перевантаження, призводить до економічного оптимального варіанту при $k < 0,9$. Урахування перших двох та четвертого члену, тобто частини експлуатаційних витрат, які пов'язані із критерієм втомленої міцності, призводить до оптимального k в межах 0,92 ... 1,02. Одночасне врахування усіх чотирьох членів (критеріїв втомленості та разового перевантаження) призводить до оптимальних значень k від 0,95 до 1,05.

Висновок. Отримано принципово новий метод визначення економічних показників при нормуванні поздовжньої міцності корпусу судна із використанням комплексного підходу оптимізації топології, розмірів та форми.

ЛІТЕРАТУРА

[1]. Бубнов И.Г. Строительная механика корабля, ч. 1. СПб, 1912. – 330 с.

- [2]. Родионов А.А. Прямые и обратные задачи строительной механики. ЦНИИ им. А.Н.Крылова, Труды НТК «Бубновские чтения». СПб, 1998. С. 137-138.
- [3]. Тряскин В.Н. Применение теории планирования эксперимента при проектировании конструкций корпуса судна. // Проблемы проектирования корпусных конструкций: Сб.науч. тр./ ЛКИ. Л., 1987. – С. 26-35.
- [4]. Коробанов Ю.Н. Лищук О.М., Лищук И.М. Анализ предпосылок использования методов граничных элементов в судостроительных системах автоматизированного проектирования // 36. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2006. – № 2 (407). – С. 31-38.
- [5]. Лугінін О.Є., Терлич С.В., Антофій Н.М. Сучасні підходи системного аналізу оцінки підприємницьких ризиків // Науково-виробничий журнал «Бізнес-навігатор». Херсон: МУБіП. – №6 (55). – 2019. – С. 98-104.
- [6]. Егоров Г.В. Исследование риска аварий корпусов транспортных судов ограниченных районов плавания за 1991-2010 годы // Вестник ОНМУ. Одесса: ОНМУ, 2010. – Вып. 30. – С. 53-76.
- [7]. Чжо Лин Проблемы развития грузовых перевозок водным транспортом в Союзе Мьянма // Морской вестник. – СПб., 2008. – №.2 (26). – С. 23-25.
- [8]. Кулеш В.А, Дам Ван Тунг, Сайфутдинов Т.А. Анализ влияния формы корпуса на прочность шпангоутов // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2019. №2 (39). – С. 57-67.
- [9]. Иванов В.П., Нго Дик Хант Концепция рыболовных судов наливного типа и методология их оптимизационного проектирования // Известия БГАРФ, 2013. №1. – С. 15-25.
- [10]. Брюхова К.С., Максимов П.В. Алгоритм топологической оптимизации на основе метода ESO // Междунар. науч.-исслед. журнал. – 2016. – № 9 – С. 16-24.
- [11]. Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Учет многоосности нагружения узлов соединения конструкций морской техники при расчетах их усталостной прочности // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Спец. выпуск 1. С. 153-161.
- [12]. Егоров Г.В. О причинах переломов корпусов судов // Проблемы техники. – 2002. – №2. – С. 3-15.
- [13]. Апалько Т.А. Букшев А.В., Ван Фэн, Сунь Тянь Ши Уравнение вместимости саморазгружающегося судна-цементовоза // Морские интеллектуальные технологии. 2019, № 4, (46), т. 1, С. 23-31.
- [14]. Егоров Г.В. Исследование риска при эксплуатации судов смешанного плавания // Сб. научн. трудов УГМТУ. Николаев: УГМТУ, 2000. – №5. – С. 49-59.
- [15]. Luis A. Lau-Shigyo, Juan C. Cutipa-Luque, José A. Herrera Quispe, Pablo R. Yanyachi Edson- J Unmanned Surface Vehicle Hull Shape Design // 2021 IEEE XXVIII International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), pp.1-4, 2021.
- [16]. Особливості проектування морських транспортних суден: Навчальний посібник / О.В. Бондаренко, О.І. Кротов, Л.О. Матвеев, С.О. Прокудін. Миколаїв: НУК. Ч. 2, 2004. – 80 с.

The Economic Factors Accounting For Evaluating Of Ship Hull Longitudinal Strength Shchedrolosiev O.V.¹, Konovalova H.V.², Bondarchuk O.V.³

Annotation.

Currently, there is no comprehensive approach to the optimization of hull structures, which combines the three types of optimization described above and which will allow the use of modern algorithms to find optimal solutions that can not be found by traditional methods. The purpose of the study is to develop and test a method for calculating economic indicators in the normalization of the longitudinal strength of the hull using a comprehensive approach to optimize the topology, size and shape. At the same time, the proposed device should be as simple as possible for the user, regardless of his level of prior training.

Keywords: longitudinal strength of ships, economic justification, economic indicators, topological optimization.