

УДК 629.5.017-048.34

DOI 10.47049/2226-1893-2024-1-30-42

## АЛГОРИТМ ПОЕТАПНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ СУДНОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА КРИТЕРІЯМИ НАДІЙНОСТІ ТА ЕКОНОМІЧНОСТІ

**А.В. Гришин**

д.т.н., професор кафедри «Машинознавство й інженерна механіка»

**В.В. Олейніков**

к.т.н., доцент кафедри «Машинознавство й інженерна механіка»

**Н.О. Яременко**

к.т.н., доцент кафедри «Машинознавство і інженерна механіка»

**Н.В. Савчук**

старший викладач кафедри «Математика, фізика та астрономія»

*Одеський національний морський університет, Одеса, Україна*

**Анотація.** Питання раціонального проектування конструкцій та зниження їх матеріаломісткості при оптимальному запасі надійності ніколи не втрачали своєї актуальності. В умовах реального проектування будівельних, суднових, авіаційних конструкцій проектувальнику доводиться рахуватися найчастіше не з одним, а з декількома, зазвичай суперечливими критеріями та переслідувати декілька екстремальних цілей.

В таких випадках задача оптимального проектування є задачею багато-критеріальної оптимізації.

Оптимальне проектування суднових конструкцій є техніко-економічною проблемою, для якої мінімальна вага (або вартість) не є єдиною ознакою оптимальності. У цій роботі ставиться завдання щодо проектування конструкції мінімальної ваги (або вартості) з оптимальним запасом надійності, що відповідає мінімуму сумарних витрат на виготовлення та експлуатацію впродовж встановленого терміну служби. В якості критеріїв оптимізації розглядаються мінімальні середні очікувані загальні витрати з урахуванням можливого збитку від руйнування та мінімальна маса конструкції з дотриманням обмежень на напруження, жорсткість, а також обмежень проектно-технологічних параметрів.

Викладається алгоритм поетапної оптимізації суднових конструкцій на прикладі оптимізації несучих конструкцій твіндечної люкової кришки суховантажного судна, що виявили низьку надійність у процесі експлуатації. Для визначення оптимальних параметрів конструкції використовується алгоритм випадкового пошуку у поєднанні з методом скінчених елементів (МСЕ). Отримана в результаті розв'язання задачі оптимізації конструкція основного ребра жорсткості люкової кришки, незважаючи на незначне збільшення маси, тим не менш у повній мірі задовольняє вимогам оптимальної надійності та економічності.

© Гришин А.В., Олейніков В.В., Яременко Н.О., Савчук Н.В., 2024

За допомогою запропонованого алгоритму принципово вирішено поставлене в роботі завдання щодо проектування конструкції мінімальної ваги з оптимальним рівнем надійності, яке відповідає мінімуму сумарних витрат на виготовлення та експлуатацію. Техніко-економічний підхід може бути практично реалізований при проектуванні та модернізації суднових конструкцій за умови збору та систематизації статистичної інформації про навантаження, матеріали, витрати на виготовлення та ремонт, а також економічні наслідки відмов конструкції.

**Ключові слова:** оптимальне проектування, суднові конструкції, критерій якості, функція мети, багатокритеріальна оптимізація, методи оптимізації, коефіцієнт запасу.

UDC 629.5.017-048.34

DOI 10.47049/2226-1893-2024-1-30-42

### ALGORITHM FOR STEP-BY-STAGE OPTIMIZATION OF SHIP STRUCTURES ACCORDING TO THE CRITERIA OF RELIABILITY AND ECONOMY

**A. Grishin**

Doctor of Technical Sciences, Professor  
of the Department of «Mechine Science and Engineering Mechanics»

**V. Oleynikov**

PhD Associate Professor  
of the Department of «Mechine Science and Engineering Mechanics»

**N. Yaremenko**

PhD, Associate Professor  
at the Department «Machine Science and Engineering Mechanics»

**N. Savchuk**

Senior lecturer at the Department «Mathematics, Physics and Astronomy»

*Odesa national maritime university, Odesa, Ukraine*

**Abstract.** *The issues of rational design of structures and reducing their material consumption with an optimal margin of reliability have never lost their relevance. In the conditions of real design of construction, ship, and aircraft structures, the designer most often has to reckon with not one, but several usually contradictory criteria and pursue several extreme goals. In such cases, the problem of optimal design is a problem of multicriteria optimization.*

*The optimal design of ship structures is a technical and economic problem for which the minimum weight (or cost) is not the only sign of optimality.*

*In this work, the task of designing a structure of minimum weight (or cost) with an optimal margin of reliability, which corresponds to the minimum total costs for manufacturing and operation during the established service life, is set. As optimization criteria, the minimum average expected total costs are considered, taking into account the possible damage from destruction and the minimum weight of the structure, while*

observing the restrictions on stress, stiffness, as well as the limitations of structural and technological parameters.

The algorithm for the step-by-step optimization of ship structures is presented on the example of the optimization of the load-bearing structures of the twin deck hatch cover of a dry cargo ship, which revealed low reliability during operation. To determine the optimal design parameters, a random search algorithm was used in combination with the finite element method (FEM). The design of the main stiffener of the hatch cover obtained as a result of solving the optimization problem, despite a slight increase in mass, nevertheless fully meets the requirements of optimal reliability and economy.

With the help of the proposed algorithm, the task of designing a structure of minimum weight with an optimal level of reliability, which corresponds to the minimum total costs for manufacturing and operation, is fundamentally solved.

The technical and economic approach can be practically implemented in the design and modernization of ship structures, provided that statistical information is collected and systematized about the load, materials, costs of manufacture and repair, as well as the economic consequences of structural failures.

**Keywords:** optimal design, ship structures, quality criterion, goal function, multicriteria optimization, optimization methods, safety factor.

**Вступ.** Питання раціонального проектування конструкцій та зниження їх матеріаломісткості при оптимальному запасі надійності ніколи не втрачали своєї **актуальності**. Оптимальне проектування конструкцій є техніко-економічною проблемою, яка може бути сформульована як завдання математичного програмування з пошуку екстремуму деякого критерію оптимальності, що функціонально залежить від параметрів проектування  $x_i$  та зазвичай називається критерієм якості або цільовою функцією.

Більшість задач оптимального проектування є складними нелінійними задачами, в яких потрібно мінімізувати цільову функцію  $\Phi\{X\}$  шляхом зміни компонент вектору змінних проектування  $\{X\}^T = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

В якості змінних проектування приймаються товщини листів, геометричні розміри конструкції, жорсткісні характеристики поперечних перерізів.

У загальному вигляді задача оптимізації конструкції зводиться до знаходження такого вектору  $\{X^*\}^T = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ , за допомогою якого розв'язується задача

$$\Phi\{X\} \rightarrow \min \quad (1)$$

при системі проектних обмежень

$$g_j\{X\} \leq, =, \geq b_j \quad (j=1, 2, \dots, m). \quad (2)$$

У залежності від виду функції якості, наявності та виду обмежень знаходять застосування ті або інші методи математичного програмування (лінійні, нелінійні, динамічне програмування, методи випадкового пошуку тощо).

Однак найважливіші практичні результати було отримано лише при використанні чисельних методів прямого аналізу конструкцій у поєднанні з одним з методів оптимізації. Отримане оптимальне рішення може служити у якості зразку, до якого треба прагнути при проектуванні реальної конструкції.

В умовах реального проектування будівельних, суднових, авіаційних конструкцій проектувальнику доводиться рахуватися найчастіше не з одним, а з декількома, зазвичай суперечливими критеріями та переслідувати декілька екстремальних цілей.

У таких випадках задача оптимального проектування є задачею *багатокритеріальної оптимізації* й може бути представлена наступним чином:

знайти вектор змінних проектування  $\{X^*\} \in \Omega$ , який мінімізує цільову функцію

$$\Phi\{X\} = [f_1\{X\}, f_2\{X\}, \dots, f_k\{X\}] \rightarrow \min, \quad (3)$$

де  $f_i\{X\}$  – критерії якості

При цьому задача полягає в одночасній мінімізації  $k$  критеріїв

$$f_i\{X\} \rightarrow \min \quad (i = 1, 2, \dots, k). \quad (4)$$

Вектор  $\{X\}$  належить до допустимої множини  $\Omega$ , яка визначається системою обмежень (2).

При багатокритеріальній оптимізації зазвичай не існує єдиного рішення, яке було б оптимальним для всіх критеріїв водночас. В цьому випадку можна говорити лише про задовільне або компромісне розв'язання, так званим оптимумом за Парето (або Парето-оптимальним розв'язанням), яке не обов'язково містить тільки оптимальні точки [1]. Постановка багатокритеріальної задачі відрізняється більшою близькістю до реальної проблеми проектування та вільна від зайвої ідеалізації проектуємого об'єкту. В теперішній час немає строгої математичної теорії багатокритеріальної оптимізації, однак в практичній діяльності аналогічні задачі успішно розв'язуються [2; 3; 4].

Оптимальне проектування суднових конструкцій є техніко-економічною проблемою, для якої мінімальна вага (або вартість) не є єдиною ознакою оптимальності. Системний підхід до проектування конструкцій включає в поняття оптимальності й вимогу високої надійності та довговічності при мінімальних витратах на виготовлення та експлуатацію.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Теорія оптимального проектування конструкцій (ОПК) відноситься до одного з розділів механіки деформованих середовищ, що розвиваються найшвидше. Успіхи, досягнуті до теперішнього часу у вирішенні прямих завдань будівельної механіки, пов'язані з розвитком електронної обчислювальної техніки і появою найуніверсальнішого чисельного методу – методу скінчених елементів (МСЕ) [5], який отримав поширення у розрахунках міцності, стійкості й коливальності у будівництві, літакобудуванні, суднобудуванні та інших галузях техніки.

Загалом, стан проблеми оптимального проектування конструкцій з використанням МСЕ досить повно викладено у монографіях [6; 7].

Значний внесок у розвиток теорії та розв'язання практичних завдань проектування оптимальних конструкцій зробили вітчизняні вчені О.Г. Алексєєв [8], Н.В. Баничук [6, 9], В.Б. Гриньов [10], В.П. Малков [11], Ю.М. Почтман [2; 3; 12], А.А. Родіонов [13], Г.В. Філатов [14], В.А. Троїцький [15] та іноземні автори Д. Хіммельблау [16], Е. Хог, Я. Арора [17], О.Ф. Хьюз [18], М. Араї (M. Arai), Р.Т. Хафтка (R.T. Haftka), Д.Хартман (D.Hartmann) [19-21].

Проблема оптимального проектування суднових конструкцій, є складовою частиною більш загальної проблеми ОПК і має свою характерну історію та перспективу розвитку. У фундаментальних працях представників вітчизняної школи міцності корабля: І.Г.Бубнова, Ю.О.Шиманського, П.Ф. Папковича, Н.В. Маттес, О.О. Курдюмова, Н.Е. Путова, І.Н. Сіверцева були сформульовані основні принципи раціонального конструювання корпусу, досліджені оптимальні форми суднових профілів.

У даний час більшість праць з оптимізації суднових конструкцій являє собою розробку окремих методик оптимізації з використанням індивідуальних підходів, обмежених особливостями конкретних об'єктів. Серед праць, присвячених оптимізації суднових конструкцій, можна виділити роботи О.О. Родіонова, В.А. Постнова, В.М. Упирьова, В.П. Малкова, Г.А. Животовського, Г.Б. Крижевича.

В останні роки активно розробляються алгоритми та програмні комплекси (ПК) при використанні засобів ПК ANSYS [22] для топологічної та параметричної оптимізації суднових конструкцій [23]. Однак широке практичне впровадження методів (ОПК) у процес проектування суднових конструкцій пов'язане з розв'язанням техніко-економічних проблем прогнозування та забезпеченням їх надійності.

**Постановка задачі.** У цій роботі ставиться завдання щодо проектування конструкції мінімальної ваги (або вартості) з оптимальним запасом надійності, що відповідає мінімуму сумарних витрат на виготовлення та експлуатацію впродовж встановленого терміну служби.

Завдання оптимального проектування у такій постановці є типовим завданням багатокритеріальної оптимізації, у процесі вирішення якої доводиться домагатися здійснення не лише однієї, а й кількох екстремальних цілей шляхом відповідного вибору структури та параметрів конструкції. Цей напрямок в оптимальному проектуванні пов'язаний із прагненням зробити результати оптимізації більш реалістичними.

**Викладення основного матеріалу.** Алгоритм розв'язання поставленої техніко-економічної задачі оптимального проектування можна здійснити в два етапи:

- 1) визначення оптимального запасу міцності (надійності) конструкції, що відповідає мінімуму сумарних витрат на виготовлення та експлуатацію при виконанні умов міцності, жорсткості, стійкості та конструктивних обмежень;
- 2) проектування конструкції мінімальної ваги при заданому оптимальному запасі надійності за тих же обмежень.

Вибір оптимальних запасів надійності конструкції на першому етапі може бути здійснено шляхом мінімізації функції середньоочікуваних сумарних витрат на виготовлення та подальшу експлуатацію за увесь термін служби [24]:

$$Z = S_0\{X\} + Q\{X\}U\{X\}, \quad (5)$$

де  $S_0\{X\}$  – вартість виготовлення конструкції;

$Q\{X\}$  – ймовірність руйнування конструкції;

$U\{X\}$  – сума прямих економічних втрат, пов'язаних з відновленням або ремонтом конструкції і непрямих, викликаних виведенням судна з експлуатації, псуванням вантажу, порушенням екології тощо.  $\{X\}_T = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$  – вектор оптимізуємих параметрів (рис. 1).

Другий етап задачі пов'язаний з проблемою проектування конструкції мінімальної ваги (обсягу):

$$F = (x_1 \cdot x_2 + x_3 \cdot x_4) \cdot l \rightarrow \min. \quad (6)$$

На обох етапах можуть бути використані методи математичного програмування.

Як приклад розв'язання такого завдання розглянуто оптимізацію несучих конструкцій люкових кришок, що виявили низьку надійність у процесі експлуатації (рис. 1).

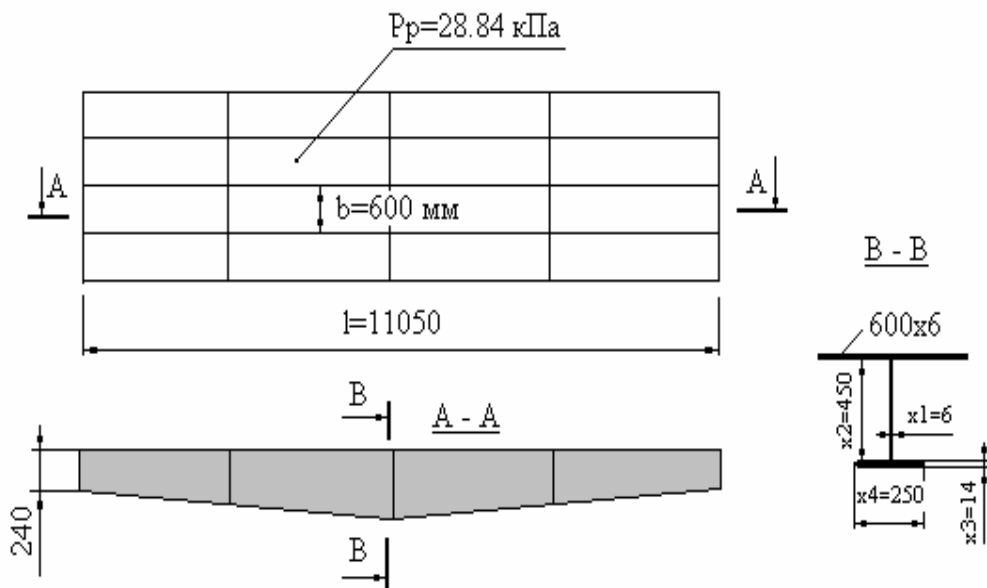


Рис. 1. Твіндексна кришка люкового закриття суховантажного судна  
( $V = 0.06225 \text{ м}^3$ )

Вихід з ладу зазначених конструкцій, що досить часто зустрічається на сучасних суховантажних суднах, пов'язаний з серйозними аварійними ситуаціями, псуванням вантажу, виведенням судна з експлуатації й призводить до суттєвих економічних збитків. Отже, питання, пов'язані з раціональним проектуванням конструктивних елементів люкових кришок, набувають першорядного значення та мають знайти відображення в нормативних документах. Задача сформульована наступним чином.

Знайти такі розміри основного несучого елементу люкової кришки, які забезпечують мінімум середньоочікуваних сумарних витрат на виготовлення та експлуатацію з урахуванням можливого збитку від руйнування, а також мінімальну вагу конструкції при задоволенні обмежень за напруженням, жорсткістю та дотриманні конструктивно-технологічних вимог.

На першому етапі розв'язання задачі визначалися оптимальні характеристики надійності конструкції з умови мінімуму середньоочікуваних сумарних витрат на виготовлення та експлуатацію (5), яка в простішому випадку може бути представлена у вигляді функції від умовного коефіцієнту запасу [24; 25]

$$Z = K^0 + N(\bar{U} + \hat{S}K^0)\exp[-P^{Kp}(K-1)^{Kp}], \quad (7)$$

де  $K = P_{np}/P_0$  – умовне значення коефіцієнту запасу;

$P_{np}$ ,  $P_0$  – граничне значення несучої здатності за навантаженням та умовне розрахункове значення навантаження, близьке до його середнього значення. Для основного ребра жорсткості люкового закриття параметри  $P_{np}$  та  $P_0$  конкретизуються наступним чином:

$P_{np} = W_{пл}\phi_{пл}\sigma_T$  – граничне значення згинального моменту;

$W_{пл}$  – пластичний момент опору ребра;

$\sigma_T = 295 \text{ МПа}$  – межа пластичності матеріалу.

$P_0 = 0.125P_b b^2$  – розрахункове значення згинального моменту;

$P_b = 2.94 \text{ т/м}^2$  – інтенсивність розрахункового рівномірно розподіленого навантаження для люкової кришки.

Параметри закону Вейбулла  $a_p$  і  $k_p$  можна визначити за довготривалим розподіленням інерційних навантажень із забезпеченістю  $Q = 10^{-8}$ .

Для суховантажного судна довжиною  $L = 150 \text{ м}$  при плаванні у Північній Атлантиці  $a_p \approx (0,08 - 0,12)P_0$ ;  $k_p \approx 1,0$ . Тоді  $P = P_0/a_p \approx 10-12$ . Решта параметрів, що входять до виразу (7), прийняті рівними:

$\bar{U} = U/S_0 = 10^2$  – середньомовірний відносний непрямий економічний збиток, викликаний пошкодженням конструкції кришки (виведення судна з експлуатації, втрата прибутку, псування вантажу);

$S_0$  – базова вартість виготовлення (модернізації) конструкції при  $K = 1.0$ ;

$\hat{S} = S/S_0 = 1.0$  – відносні витрати на ремонт конструкції;

$\theta = 2/3$  – емпіричний параметр у виразі для будівельної вартості, який визначається з аналізу фактичних витрат на виготовлення конструкції;

$N = 10^8$  – число циклів змінних навантажень за термін служби судна  $T$ .

Тоді перший етап можна сформулювати як задачу визначення величини пластичного моменту опору основного ребра жорсткості  $W_{пл}\{X\}$ , який мінімізує цільову функцію виду (7). З урахуванням прийнятих значень параметрів цільова функція (7) перепишеться наступним чином:

$$Z = (W_{пл}\{X\} \cdot 10^{-3})^{2/3} + 10^8 [10^2 + (W_{пл}\{X\} \cdot 10^{-3})^{2/3}] \exp[-12(W_{пл}\{X\} \cdot 10^{-3} - 1)], \quad (8)$$

де  $\{X\} = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$  – вектор параметрів проєктування;

$x_1, x_2$  – товщина та висота профілю,

$x_3, x_4$  – товщина та ширина вільного пояска (рис.1).

У результаті розв’язання першого етапу задачі *методом випадкового пошуку* [26;27] була отримана оптимальна величина моменту опору основного ребра жорсткості у середній частині, що відповідає мінімуму функції (7)

$$W_{опт}\{X\} = 2860 \text{ см}^3.$$

На другому етапі розв’язання відшукуються параметри люкової кришки мінімальної маси з отриманим оптимальним рівнем надійності. У якості цільової приймається функція площі поперечного перерізу

$$F = x_1 \cdot x_2 + x_3 \cdot x_4 \rightarrow \min. \quad (9)$$

Оптимальне значення пластичного моменту опору  $W_{опт}$ , отримане на першому етапі, вводиться у якості обмеження  $W_{пл}\{X\} \geq W_{опт}$ .

Крім того, прийняті наступні обмеження:

- за нормальними напруженнями

$$\sigma\{X\} = M_{max}/W\{X\} \leq [\sigma] = 0.5\sigma_T = 147.5 \text{ МПа}; \quad (10)$$

- за дотичними напруженнями

$$\tau \leq [\tau] = 85.2 \text{ МПа}; \quad (11)$$

- при обмеженнях за жорсткістю у відповідності з вимогами Правил Регістру

Несуча здатність люкових кришок, як показує досвід експлуатації, у значному ступеню залежить від стійкості пластин останньої як стиснутого пояску балки. Приймаючи до уваги цю обставину, момент опору  $W_z\{X\}$  та момент інерції  $J_z\{X\}$  поперечного перерізу основного ребра жорсткості люкової кришки, слід визначати з урахуванням редуціювання стислого приєднаного пояска настилу люкової кришки. В обмеженнях наведена площа приєднаного пояска визначалась методом послідовних наближень.

Крім того, на параметри конструкції накладалися наступні конструктивні обмеження:



$$\begin{aligned} 6 \leq x_1 \leq 8 \text{ (мм)}; & \quad 100 \leq x_2 \leq 700 \text{ (мм)}; \\ 10 \leq x_3 \leq 16 \text{ (мм)}; & \quad 100 \leq x_4 \leq 400 \text{ (мм)}. \end{aligned}$$

Для визначення оптимальних параметрів балки використовувався алгоритм випадкового пошуку у поєднанні з МСЕ.

При цьому дискретна модель балки містила 24 елементи, для кожного з них здійснювався пошук оптимальних параметрів при вказаних обмеженнях.

У результаті розрахунку при варіюванні усіх чотирьох параметрів була отримана конфігурація конструкції, наведена на рис. 2, з обсягом  $V_{\text{опт}} = 0,0665 \text{ м}^3$ . Зростання маси оптимальної конструкції у порівнянні з вихідною ( $V = 0,06225 \text{ м}^3$ ) складає 6,8 % (відсотків) при збільшенні умовного коефіцієнту запасу у 1,52 рази ( $K_{\text{опт}} = 3.19$ ).

Якщо спроектувати задану балку тільки лише за критерієм мінімальної маси, без урахування вимог надійності, то рівномірна конструкція балки в цьому випадку матиме обсяг  $V = 0,05175 \text{ м}^3$  при коефіцієнті запасу  $K = 1,95$ .

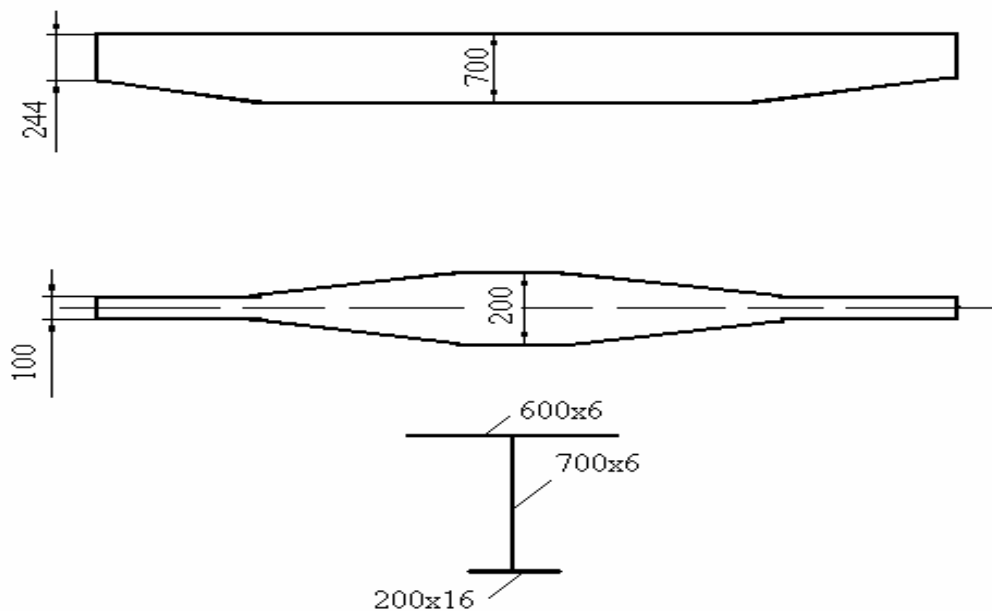


Рис. 2. Оптимальна конструкція основного ребра жорсткості люкової кришки  
( $V_{\text{опт}} = 0,0665 \text{ м}^3$ )

Таким чином, отримана в результаті розв'язання задачі оптимізації конструкція основного ребра жорсткості люкової кришки, незважаючи на незначне збільшення маси, тим не менш у повній мірі задовольняє вимогам оптимальної надійності та економічності.

## Висновки

1. Оптимальне проектування суднових конструкцій є техніко-економічною проблемою, яка потребує комплексного обліку численних вимог будівництва та експлуатації судна.
2. За допомогою запропонованого алгоритму принципово вирішено поставлене в роботі завдання щодо проектування конструкції мінімальної ваги з оптимальним рівнем надійності, яке відповідає мінімуму сумарних витрат на виготовлення та експлуатацію.
3. Техніко-економічний підхід може бути практично реалізований при проектуванні та модернізації суднових конструкцій за умови збору та систематизації статистичної інформації щодо навантаження, матеріалів, витрат на виготовлення та ремонт, а також економічних наслідків відмов конструкцій.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Почтман Ю.М. Модели и методы многокритериальной оптимизации конструкций. Днепропетровск, 1984. 132 с.
2. Почтман Ю.М., Герасимов Е.Н., Скалозуб В.В. Многокритериальная оптимизация конструкций. Киев, 1984. 134 с.
3. Скалозуб В.В. Многокритериальная оптимизация пластин и оболочек в условиях неполной исходной информации: Автореферат диссертации канд. техн. наук. Днепропетровск, 1982. 21 с.
4. Бараненко В.О. Багатокритеріальні задачі синтезу ШСС та динамічне програмування // Вісник ПДАБіА: Науковий та інформаційний бюлетень. Дніпропетровськ, 2000. № 10. С. 4-12.
5. Zienkiewicz O.C., Cheung Y.K. The finite element method in structural and continuum mechanics. London, 1967. 268 p.
6. Zienkiewicz O.C. The Finite Element Method in Engineering Science. 53: McGraw-Hill, 1971. 521 p.
7. Немчинов Ю.И. Расчет пространственных конструкций (методом конечных элементов). К.: Будівельник, 1980. 232 с.
8. Сахаров А.С., Кислоокий В.Н. Метод конечных элементов в механике твердых тел. Киев: Вища школа, 1982. 478 с.
9. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики. Библиотека журнала «Мир геотехники», 9-й выпуск. З.:ООО «ИПО «Запорожье», 2009. 400 с.
10. Гринев В.Б., Филиппов А.П. Оптимизация элементов конструкций по механическим характеристикам. Киев: Наукова думка, 1975. 294 с.
11. Бейко И.В., Бублик Б.Н., Зинько П.Н. Методы и алгоритмы решения задач оптимизации. К.: Вища школа, 1983. 511 с.
12. Овчинников И.Г., Почтман Ю.М. Тонкостенные конструкции в условиях коррозионного износа: расчёт и оптимизация. Днепропетровск: ДГУ, 1995. 192 с.

13. Почтман Ю.М. Метод конечных элементов в задачах оптимального проектирования конструкций в условиях воздействия агрессивных сред // *Theoretical Foundations in Civil Engineering*. 1996. vol. 1. P. 220-224.
14. Почтман Ю.М., Шульга С.А. Применение теории планирования экстремальных экспериментов к оптимальному проектированию композитных оболочек. В кн.: *Гидроаэромеханика и теория упругости*. Днепропетровск: ДГУ, 1982, с.140-145. (Сб. научных трудов; вып. 29).
15. Філатов Г.В. Оптимальне проектування конструкцій методами випадкового пошуку. Дніпропетровськ: УДХТУ, 2003. 432 с.
16. Скалозуб В.В. Параметризация задач векторной оптимизации конструкций // *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: Зб. наук. праць*. Дніпропетровськ. 1997. Т.2. С. 92-98.
17. Фрідман М.М. Концептуальні підходи при оптимальному проектуванні конструкцій, що функціонують в екстремальних умовах // *Опір матеріалів і теорія споруд*. 2002. № 70. С. 158-175.
18. Gellatly R. A., Gallagher R. H. A procedure for automated minimum weight design. Part I. Theoret. Basis. *Aeron. Quart.* 1966. Vol. 7. Iss. 7. P. 63-66.
19. Arai M., Shimizu T. Optimisation of the design of ship structures using response surface methodology// *Practical Design of Ships and Other Floating Structures*, PRADS 2001, 2001, P. 331-339.
20. Haftka R.T. Simultaneous analysis and design // *AIAA J.* 1985. V.23. № 7. P. 1099-1103.
21. Hartmann D. Computer aided structural optimization by means of evolution strategies // *Report # NCB/SESM-84/8*, University of California, Berkeley, USA, 1984.
22. ANSYS. Basic Analysis Procedures Guide. Rel. 5.3. / ANSYS Inc. Houston, 1994.
23. Козляков В.В., Олейников В.В. Техничко-економическое обоснование модернизации корпусных конструкций с низкой надежностью. В кн. *Судостроение и судоремонт*. Вып. VII., 1976. С. 68-72 [ОИИМФ].
24. Козляков В.В., Крайний Ю.А., Олейников В.В. Об оценке и обеспечении предельной пластической прочности судовых стареющих конструкций. *Зб.наук.праць УДМТУ.Миколаїв:УДМТУ,1999. № 4(364). С.21-32.*
25. Растринин Л.А. Случайный поиск в задачах оптимизации многопараметрических систем. Рига: Зинатне, 1965. 287 с.
26. Філатов Г.В. Приложение методов случайного поиска к оптимизации конструкций. моногр. Саарбрюккен, Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 177 с.
27. Filatov G.V. Application of Random Search Method for the Optimal Designing of Ribbed Plates. *Intern. J. Emerging Techn. and Advanced Eng.* 2019. Vol. 9. Iss. 10. P. 223-228.

## REFERENCES

1. Pochtman Yu.M. *Models and methods of multicriteria optimization of structures*. Dnepropetrovsk, 1984. 132 p.
2. Pochtman Yu.M., Gerasimov E.N., Skalozub V.V. *Multicriteria optimization of structures*. Kyiv, 1984. 134 p.
3. Skalozub V.V. *Multicriteria optimization of plates and shells in conditions of incomplete initial information: Abstract of the dissertation of Ph.D. tech. Sci.* Dnepropetrovsk, 1982. 21 p.
4. Baranenko V.O. *Multi-criteria problems of SHSS synthesis and dynamic programming* // *Bulletin of PDABiA: Scientific and informational bulletin*. Dnipropetrovsk, 2000. No. 10. P. 4-12.
5. Zienkiewicz O. C., Cheung Y. K. *The finite element method in structural and continuum mechanics*. London, 1967. 268 p.
6. Zienkiewicz O. C. *The Finite Element Method in Engineering Science*. 53: McGraw-Hill, 1971. 521 p.
7. Nemchinov Yu.I. *Calculation of three-dimensional structures (finite element method)*. K.: Budivelnik, 1980. 232 p.
8. Sakharov A.S., Kislookiy V.N. *The method of finite elements in the mechanics of solid bodies*. Kyiv: Higher School, 1982. 478 p.
9. Klovanych S.F. *Finite element method in non-linear problems of engineering mechanics*. Library of the journal «World of geotechnics», 9th edition. Z.: OOO IPO Zaporozhye, 2009. 400 p.
10. Grinev V.B., Filippov A.P. *Optimization of structural elements according to mechanical characteristics*. Kiev: Naukova dumka, 1975. 294 p.
11. Beiko I.V., Bublyk B.N., Zinko P.N. *Methods and algorithms for solving optimization problems*. K.: Higher School, 1983. 511 p.
12. Ovchinnikov I.G., Pochtman Yu.M. *Thin-walled structures under conditions of corrosive wear: calculation and optimization*. Dnipropetrovsk: DSU, 1995. 192 p.
13. Pochtman Yu.M. *Finite element method in problems of optimal design of structures under the influence of aggressive environments*. // *Theoretical Foundations in Civil Engineering*. 1996. vol. 1. R. 220-224.
14. Pochtman Yu.M., Shulga S.A. *Application of the theory of planning extreme experiments to the optimal design of composite shells*. In the book: *Hydroaeromechanics and elasticity theory*. Dnepropetrovsk: DSU, 1982, pp. 140-145. (Collection of scientific works, issue 29).
15. Filatov G.V. *Optimal design of structures by random search methods*. Dnipropetrovsk: UDHTU, 2003. 432 p.
16. Skalozub V.V. *Parameterization of problems of vector optimization of structures* // *Problems of computational mechanics and strength of structures: Collection of science works Dnipropetrovsk*. 1997. T.2. P. 92-98.
17. Friedman M.M. *Conceptual approaches in the optimal design of structures operating in extreme conditions* // *Resistance of materials and theory of structures*. 2002. No. 70. P. 158-175.

18. Gellatly R. A., Gallagher R. H. *A procedure for automated minimum weight design n. Part I. Theoret. Basis. Aeron. Quart.* 1966. Vol. 7. Iss. 7. P. 63–66.
19. Arai M., Shimizu T. *Optimisation of the design of ship structures using response surface methodology// Practical Design of Ships and Other Floating Structures, PRADS 2001, 2001, P. 331-339.*
20. Hafika R.T. *Simultaneous analysis and design // AIAA J.* 1985. V.23. № 7. P. 1099-1103.
21. Hartmann D. *Computer aided structural optimization by means of evolution strategies //Report # NCB/SESM-84/8, University of California, Berkeley, USA, 1984.*
22. *ANSYS. Basic Analysis Procedures Guide. Rel. 5.3. / ANSYS Inc. Houston, 1994.*
23. Kozlyakov V.V., Oleynikov V.V. *Feasibility study for the modernization of hull structures with low reliability. In the book. Shipbuilding and ship repair. Issue VII., 1976. P. 68-72 [OIMF].*
24. Kozlyakov V.V., Krainy Yu.A., Oleynikov V.V. *On assessing and ensuring the ultimate plastic strength of aging ship structures. Zb.nauk.prats UDMTU. Mikolaiv:UDMTU, 1999. No. 4 (364). P.21-32.*
25. Rastrigin L.A. *Random search in optimization problems of multiparameter systems. Riga: Zinatne, 1965. 287 p.*
26. Filatov G.V. *Application of random search methods to optimization of structures. monogr. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 177 p.*
27. Filatov G.V. *Application of Random Search Method for the Optimal Designing of Ribbed Plates. Intern. J. Emerging Techn. and Advanced Eng.* 2019. Vol. 9. Iss. 10. P. 223-228.

*Стаття надійшла до редакції 15.12.2023*

**Посилання на статтю: Гришин А.В., Олейніков В.В., Яременко Н.О., Савчук Н.В.** Алгоритм поетапної оптимізації суднових конструкцій за критеріями надійності та економічності: *Вісник Одеського національного морського університету*: 36. наук. праць, 2024. № 1 (72). С. 30-42. DOI 10.47049/2226-1893-2024-1-30-42.

*Article received 15.12.2023*

**Reference a journalartic: Grishin A., Oleynikov V., Yaremenko N., Savchuk N.** Algorithm for step-by-stage optimization of ship structures according to the criteria of reliability and economy: *Herald of the Odesa national maritime university: Coll. scient. works*, 2024. № 1 (72). 30-42. DOI 10.47049/2226-1893-2024-1-30-42.