

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Дун Сіньшо

УДК 629.5.01: 629.543

**ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ГОЛОВНИХ РОЗМІРІВ СУДНА-
ГАЗОВОЗА ДЛЯ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ЗРІДЖЕНИХ ГАЗІВ**

Спеціальність 05.08.03 – конструювання та будування суден

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Миколаїв – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті кораблебудування (НУК) імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Нєкрасов Валерій Олександрович,
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, завідувач кафедри
теорії та проектування суден.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Дихта Леонід Михайлович,
Чорноморський національний університет
імені Петра Могили, професор кафедри
прикладної та вищої математики;

кандидат технічних наук, доцент
Давидов Ігор Пилипович,
Національний університет «Одеська
морська академія», доцент кафедри
теорії та устрою судна.

Захист відбудеться "24" жовтня 2016 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.060.02 Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: 54025, м. Миколаїв, просп. Героїв Сталінграда, 9, ауд. 360.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: м. Миколаїв, просп. Героїв Сталінграда, 9.

Автореферат розісланий " " вересня 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, професор

Л.І. Коростильов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблеми розвитку енергетики, пов'язані з швидким зростанням споживання енергії в промисловості, транспорті і побутовому житті є досить важливими на сьогоднішній день. У порівнянні з вугіллям і нафтою відносно новим джерелом енергії є природний газ, масове застосування якого почалося лише на початку двадцятого століття. У зв'язку з його високою ефективністю і безпекою, потреба в природному газі інтенсивно зростає в останні роки.

Внаслідок цього виникла необхідність транспортування газу від його родовищ до споживачів. Існує два основних способи транспортування – трубопровідний і морський транспорт. Трубопровідний транспорт використовується, коли родовища газу і країни-споживачі перебувають на близькій відстані один від одного, в іншому випадку морський транспорт виявляється економічно більш доцільним і доступним.

Україна і Китай є морськими країнами, вони ж – великі країни-споживачі енергії. Для таких країн розвиток морського транспортування природного газу сприяє плюралізації джерел енергії та посиленню енергетичної незалежності. Для здійснення перевезень природного газу морем потрібен цілий комплекс технічних засобів, що утворюють єдину технологічну і транспортну систему: газовидобувні свердловини, газопроводи, станції зрідження природного газу в країнах-експортерах, судна-газовози LNG для перевезення зріджених природних газів морем, регазифікаційні станції в країнах-імпортерах. Судна-газовози LNG як транспортні засоби, відіграють значну роль у цій системі. Вони перевозять зріджені природні гази при температурі -162°C та є одними з найдорожчих і високотехнологічних транспортних суден.

У зв'язку з особливістю транспортованого вантажу та його високою небезпекою судна цього типу виділені в особливий клас. При їхньому проектуванні необхідно вирішити низку конкретних завдань, що не виникають при проектуванні інших транспортних суден. Для початкових стадій проектування, з метою забезпечення необхідного обсягу поставок і досягнення оптимальних економічних показників, задачі формування оптимального складу флоту суден-газовозів LNG і визначення їх оптимальних головних характеристик є найбільш актуальними на сьогоднішній день.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація включає результати досліджень, виконаних у відповідності з Законом України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» №3715-VI від 08.09.2011 (редакція від 05.12.2012), ст. 4 «Стратегічні пріоритетні напрями інноваційної діяльності на 2011-2021 роки» (п. 2 «освоєння нових технологій високотехнологічного розвитку транспортної системи, ракетно-космічної галузі, авіа- і суднобудування, озброєння та військової техніки») і «Транспортної стратегії України на період до 2020 року», яка затверджена розпорядженням КМУ від 20.10.2010 № 2174-р, а саме: модернізація та будівництво флоту.

Мета наукового дослідження. Метою дисертаційної роботи є удосконалення методу визначення головних елементів суден-газовозів LNG на початкових стадіях проектування.

Основні завдання дослідження. Для досягнення зазначеної мети дослідження необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести аналіз світової торгівлі зрідженим (скрапленим) природним газом.
2. Вивчити класифікацію та архітектурно-конструктивні особливості суден-газовозів LNG.
3. На основі обробки статистичних даних по суднах-газовозах LNG різних років побудови отримати наближені формули для визначення їх головних елементів.
4. Створити модель функціонування судна-газовоза LNG і підібрати метод розв'язання задачі функціонування, який буде орієнтований на пріоритетне визначення тривалості та ефективності продуктивного періоду судна у його життєвому циклі.
5. Для визначення показників ефективності та надійності судна-газовоза LNG розробити відповідну математичну модель, яка найбільш повно відображає його технічні і морехідні якості.
6. Розробити модель надійності транспортних операцій газозова LNG.
7. Розробити економічну модель судна-газовоза LNG, в якій відображається економіка його життєвого періоду: будівельна вартість судна, експлуатаційні витрати, прибуток від експлуатації та інші економічні показники.
8. Використати розроблені моделі якостей судна і його функціонування, а також показники ефективності і надійності при формуванні цільової функції, функціональних обмежень і способу розв'язання задачі пошуку екстремального значення продуктивної ефективності судна. Сформулювати та вирішити оптимізаційну задачу визначення головних елементів суден-газовозів LNG і складу флоту газозовів, що забезпечує оптимальну доставку природного газу між заданими портами.
9. Розробити комплекс прикладних програм для визначення кількості суден-газовозів LNG флоту доставки газу між заданими портами та їх головних елементів на початкових стадіях проектування.

Об'єктом дослідження є процес проектування суден-газовозів LNG, призначених для транспортування зрідженого природного газу морем.

Предмет дослідження – методи визначення кількості суден-газовозів LNG флоту доставки природного газу між заданими портами та їх основних характеристик на початкових стадіях проектування.

Методи дослідження. Для вирішення основних завдань дослідження у дисертаційній роботі використовуються методи:

1. Теорії проектування суден і теорії корабля які є теоретичною основою дослідження.
2. Регресійного аналізу – при отриманні наближених формул для визначення головних елементів судна-газовоза LNG.
3. Теорії перетворення випадкових функцій та імітаційного моделювання процесів функціонування – при вирішенні задач функціонування судна-газовоза LNG у віртуальних просторах фінансово-торгових операцій, операцій проектування і побудови, портових і транспортних операцій, операцій сервісного обслуговування, ремонту та утилізації.

4. Нелінійного програмування – для формування оптимізаційної задачі і пошуку екстремуму цільової функції.

5. Зовнішніх штрафних функцій – для перетворення задачі умовної оптимізації в задачу безумовної оптимізації.

Проблемам проектування суден-газовозів LNG присвячені роботи А. М. Вашедченко, В. В. Зайцева, Ю. М. Коробанова, С. І. Логачова, Б. М. Михайлова, М. М. Ніколаєва та інших вчених. Різноманітні аспекти оптимізації суден розроблялися в роботах О. В. Бондаренка, А. М. Вашедченка, А. Й. Гайковича, І. Г. Захарова, А. І. Кротова, О. А. Нарусбаєва, В. О. Некрасова, В. М. Пашина, О. І. Ракова, Л. Ю. Худякова, Б. А. Царьова та інших вітчизняних та закордонних вчених.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у створенні методу визначення оптимальної кількості і характеристик суден-газовозів для транспортування природного газу та встановлення основних залежностей проектування цих суден, **що відрізняються від відомих раніше** переведенням процесу дослідження з детермінованої до ймовірнісної основи, удосконаленням моделей морехідних якостей суден, розробкою ймовірнісних моделей їх функціонування та використанням ринкових критеріїв ефективності. У результаті проведених досліджень отримані наступні наукові результати:

1. Шляхом обробки сучасних статистичних даних по суднах-газовозах LNG **вперше** отримана сукупність регресійних рівнянь, яка дає змогу наближено визначити головні елементи таких суден і використати її для формування початкових значень головних розмірів суден у процесі пошуку оптимального розв'язку задачі їх проектування.

2. За допомогою цих рівнянь та сучасних досягнень гідроаеродинаміки суден **удосконалено** математичну модель судна-газовоза LNG, яка відображає основні морехідні та інженерні якості даного типу суден, а саме: масо-габаритні показники, місткість, плавучість і ходовість, що забезпечують його продуктивність і економічну ефективність, а також міцність, остійність, аварійну посадку і морехідність, що визначають рівень безпеки плавання.

3. На основі розгляду всієї сукупності операцій по створенню, експлуатації та утилізації судна-газовоза LNG для транспортування газу між портами, **вперше** розроблено ймовірнісну модель його функціонування, яка включає в себе основні функціональні операції такого судна, що дає змогу досить повно відобразити фактори надійності і ефективності його використання на проміжку часу рівному життєвому періоду.

4. Моделювання операцій судна-газовоза LNG у випадкових просторах створення і експлуатації дало змогу **вперше** визначити залежності його життєвої продуктивності і ефективності від випадкових факторів середовищ існування.

5. На основі використання сучасної системи оцінки ринкової вартості **удосконалено** метод визначення економічних показників, показників продуктивності та надійності судна-газовоза LNG, в які входять вартість побудови судна, його експлуатаційні витрати, можливі фрахтові ставки, доходи, прибуток, термін окупності та інші, що дозволяють досить повно визначити дійсний рівень ефективності проекту.

Практична цінність роботи:

– запропонований метод та його реалізація у програмному комплексі "LNG_carriers" можуть бути використані для визначення провозоспроможності, продуктивності, надійності і ефективності суден-газовозів LNG при технічних і економічних обґрунтуваннях їх проектних рішень;

– розроблений комплекс прикладних програм "LNG_carriers" також може бути застосований в науково-дослідних і проектно-конструкторських організаціях для вибору найбільш раціональних варіантів суден-газовозів LNG.

Особистий внесок здобувача. Усі теоретичні та практичні результати отримано здобувачем особисто.

Апробація роботи. Результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися і були схвалені на Всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю "Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морської техніки та інженерних споруд" (Миколаїв, 21-23 травня 2014 р., 20-22 травня 2015 р., 19-20 травня 2016 р.), на II Всеукраїнській науково-технічній конференції "Україна на шляху до Європи. Вища освіта і євроінтеграція" (Миколаїв, 06-07 грудня 2014 р.), на VIII Міжнародній практичній конференції "Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті" (Херсон, 24-26 травня 2016 р.) та на наукових семінарах кафедри теорії та проектування суден НУК (2013 – 2016 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 12 наукових робіт, з яких: 5 статей у фахових виданнях, які рекомендовані переліком ДАК МОН України, 2 статті в міжнародних журналах "Вісник АДТУ" та " Праці НДТУ ім. Р. Е. Алексєєва", 5 тез доповідей наукових конференцій.

Впровадження результатів дисертації. Розроблений метод визначення оптимальних головних елементів суден-газовозів LNG і результати розв'язання задач у програмному комплексі "LNG_carriers" впроваджені в «Морське інженерне бюро» (м. Одеса), ПАТ «Чорноморсуднопроект», та в навчальному процесі Національного університету кораблебудування (м. Миколаїв).

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і чотирьох додатків. Дисертація містить 170 сторінок основного тексту, 30 таблиць, 51 рисунок, 197 найменувань літературних джерел. Обсяг додатків – 34 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і завдання роботи, визначено об'єкт і предмет дослідження, представлено наукову новизну і практичну цінність результатів роботи.

У **першому розділі** розглянуто сучасний стан світової морської транспортування природного газу, властивості LNG і особливості його транспортування. Наведено стислі відомості про судна-газовози: класифікація суден в залежності від безпеки вантажу та способу транспортування зрідженого газу, різні вантажні танки, ізоляційний матеріал, установка вторинного бар'єру.

Проаналізовано особливості архітектурно-конструктивного типу суден-газовозів LNG. Відзначено, що у суднах-газовозах LNG широко застосовуються два

типи систем вантажних танків: система сферичних вкладних танків Moss і система мембранних танків GTT. У даній дисертаційній роботі розглядаються тільки ці дві системи танків.

Відзначено, що вибір типу енергетичної установки (ЕУ) на суднах-газовозах LNG безпосередньо пов'язаний зі способом обробки паркового газу при транспортуванні. На сьогоднішній день на газовозах LNG в основному використовуються три типи ЕУ: паротурбінні установки (ПТУ), малооборотів дизелі (МОД) з одночасною установкою повторного зрідження і DFDE (TFDE) – двопаливні (трипаливні) дизель-електричні ЕУ.

На основі аналізу статистичних даних за характеристиками понад 80 суден-газовозів LNG, побудованих з 1969 по 2015 р., отримано регресійні формули, які можуть використовуватися для наближеного визначення головних елементів суден і формування початкової точки в задачі оптимізації:

для судна-газовоза LNG типу Moss

$$DW = 0,668W^{0,977}; L = 6,678DW^{0,333}; B = 1,955DW^{0,284}; H = 1,283DW^{0,269};$$

$$T = 1,34DW^{0,19}; Ne = 111,3DW^{0,49}; L_{OA} = 1,02L + 7,702;$$

для судна-газовоза LNG мембранного типу

$$DW = 0,605W^{0,982}; L = 4,905DW^{0,358}; B = 1,557DW^{0,298}; H = 2,829DW^{0,197};$$

$$T = 0,908DW^{0,225}; Ne = 5,416DW^{0,761}; L_{OA} = 1,025L + 5,76,$$

де DW – дедвейт судна, т; W – вантажомісткість судна, м³; L – довжина судна між перпендикулярами, м; B – ширина судна, м; H – висота борту судна, м; T – осадка судна, м; Ne – потужність головних двигунів, кВт; L_{OA} – довжина найбільша, м.

За результатами виконаного огляду літератури обрано основні напрямки дослідження з удосконалення методу проектування головних елементів суден-газовозів LNG і поставлено основні завдання дисертаційної роботи.

Другий розділ присвячено формулюванню задачі визначення оптимальних головних елементів суден-газовозів LNG і вибору методів її розв'язання.

На початкових стадіях проектування суден-газовозів LNG основною проблемою є визначення кількості суден у флоті і їх головних елементів для розглянутого обсягу постачань і умов експлуатації. Прийняте проектне рішення повинно забезпечити економічну ефективність і безпеку експлуатації суден. У даний час така проблема вирішується за допомогою оптимізаційних задач проектування, що використовують методи нелінійного програмування для пошуку екстремуму цільової функції, в багатовимірному просторі.

Поставлена в дисертації оптимізаційна задача визначення головних елементів суден-газовозів LNG формулюється наступним чином: при заданому векторі U визначити такий вектор X , щоб значення цільової функції досягло екстремальної величини:

$$F(X, U) = P = I - C \rightarrow \max,$$

де $X (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор незалежних змінних; n – кількість компонентів, що утворюють вектор X ; $U (u_1, u_2, \dots, u_m)$ – вектор вхідних даних; m – кількість компонентів, що утворюють вектор U ; P, I, C – математичне сподівання прибутку, доходів та витрат від експлуатації суден протягом усього терміну експлуатації.

На компоненти вектору X накладається безліч обмежень, які поділяються на два види: тривіальні й функціональні.

Для розв'язання цієї задачі необхідно:

1. Визначити вектор незалежних змінних X . За незалежні змінні обрано наступні величини: $x_1 = L$ – довжина судна; $x_2 = B$ – ширина судна; $x_3 = H$ – висота борту судна; $x_4 = T$ – осадка судна; $x_5 = C_B$ – коефіцієнт загальної повноти; $x_6 = v_s$ – швидкість ходу; $x_7 = n_{LNG}$ – кількість суден у флоті. При цьому x_1 – x_6 є неперервними, а x_7 – цілочисельною незалежними змінними.

2. Визначити вектор вхідних даних U , до якого відносяться обсяг поставок вантажів за контрактом, щільність LNG, характеристики району плавання, дальність плавання, автономність, економічні дані, бажані характеристики суден і т. д.

3. Сформувати систему тривіальних обмежень – обмежень, що безпосередньо накладаються на компоненти X за умовами експлуатації, побудови суден і вимогами замовників:

$$(x_i)_{\min} \leq x_i \leq (x_i)_{\max}, \quad (i = 1, \dots, 7),$$

де $(x_i)_{\min}$, $(x_i)_{\max}$ – відповідно нижнє і верхнє допустиме значення i -ої незалежної змінної.

Діапазони зміни тривіальних обмежень встановлено за результатами статистичної обробки даних: $200,00 \leq L \leq 340,00$; $34,00 \leq B \leq 56,00$; $21,00 \leq H \leq 29,00$; $9,50 \leq T \leq 12,70$; $0,65 \leq C_B \leq 0,82$; $17,00 \leq v_s \leq 21,00$; $1 \leq n_{LNG} \leq 5$.

4. Сформувати систему функціональних обмежень. Функціональні обмеження накладаються на шукані змінні не безпосередньо, а через співвідношення, що зв'язують шукані змінні з якостями суден:

$$G_j(X, U) \geq 0, \quad (j = 1, \dots, k),$$

де $G_j(X, U)$ – функціонал, який характеризує j -е якість суден і відповідну вимогу; k – кількість аналізованих якостей.

У даній роботі розглянуто функціональні обмеження до наступних якостей судна:

1) плавучості

$$\left| \frac{\Delta - \sum P_i}{\Delta} \right| \leq 0,01; \quad \Delta = \rho C_B L B T,$$

де Δ – водотоннажність судна, т; $\sum P_i$ – всі складові навантаження мас проектованого судна, т; ρ – щільність морської води, т/м³.

2) ходовості

$$Ne \geq P_S = \frac{P_D}{\eta_{\Pi}},$$

де Ne – фактична потужність головних двигунів, кВт; P_S – необхідна потужність головних двигунів, кВт; P_D – потужність на гребних валах, кВт; η_{Π} – ККД передачі потужності від двигуна до рушію.

3) вантажомісткості

$$\left| \frac{Q - n_{LNG} n_T k_0 \rho_r W_r}{Q} \right| \leq 0,01,$$

де Q – загальний обсяг поставок газу за життєвий цикл суден, т; n_{LNG} – кількість суден-газовозів LNG у флоті; n_T – кількість рейсів одного судна за його життєвий цикл; k_0 – коефіцієнт заповнення вантажних танків; ρ_r – щільність LNG, т/м³; W_r – вантажомісткість судна, м³.

4) посадки та остійності

– до посадки

$$\psi_{\text{доп}} \leq \psi \leq 0,$$

де $\psi_{\text{доп}}$ – допустимий кут диференту судна, град; ψ – фактичний кут диференту судна, град.

– до початкової остійності

$$h_0 \geq 0,15,$$

де h_0 – початкова метацентрична висота, м.

– до діаграми статичної остійності

Площа позитивної частини діаграми статичної остійності повинна бути не менше

$$\begin{cases} 0,055 \text{ м} \cdot \text{рад до кута крену } 30^\circ \\ 0,09 \text{ м} \cdot \text{рад до кута крену } 40^\circ \text{ (або до кута заливання } \theta_f, \text{ якщо } \theta_f < 40^\circ) \\ 0,03 \text{ м} \cdot \text{рад между кутами крену } 30^\circ \text{ і } 40^\circ \text{ (або } \theta_f, \text{ якщо } \theta_f < 40^\circ). \end{cases}$$

Максимальне плече діаграми статичної остійності l_{max} повинно бути не менше:

$$\begin{cases} 0,25 \text{ м} & \text{якщо } L \leq 80 \text{ м} \\ 0,41 - 0,002L, \text{ м} & \text{якщо } 80 \text{ м} < L < 105 \text{ м} \\ 0,20 \text{ м} & \text{якщо } L \geq 105 \text{ м}. \end{cases}$$

при цьому кут крену θ повинен бути не меншим ніж 30° .

– до критерію погоди

$$K = b/a \geq 1,$$

де K – критерій погоди.

5) мінімальної висоти надводного борту

$$H - T \geq F_{\text{min}},$$

де F_{min} – мінімально допустима висота надводного борту, м.

6) періоду хитавиці

$$\tau_\theta \geq \tau_{\theta \text{min}},$$

де $\tau_{\theta \text{min}}$ – допустимий період хитавиці, с; τ_θ – фактичний період хитавиці, с.

7) міцності

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{M}{W} \cdot 10 \leq [\sigma],$$

де σ_{max} – максимальне нормальне напруження у міделевому перерізі, МПа; M – повне значення згинального моменту, що діє на судновий корпус на хвилюванні,

кН·м; W – момент опору еквівалентного бруса, $\text{см}^2\cdot\text{м}$; $[\sigma]$ – допустиме нормальне напруження, МПа.

8) аварійної посадки

$$\theta^* \leq [\theta],$$

де θ^* – кут крену при несиметричному затопленні бортових і міждонних відсіків, град.; $[\theta] = 30^\circ$ – допустимий кут крену.

5. Створити математичну модель проектування суден (ММПС). Значення цільової функції обчислюється у ММПС – системі алгебраїчних і диференціальних рівнянь, що включає також обчислювальну процедуру. У даній роботі ММПС може бути розділена на три взаємопов'язаних моделі: модель інженерних і морехідних якостей суден, модель функціонування суден і економічна модель суден.

У першій моделі обчислюються основні інженерні та морехідні якості суден. У моделі функціонування розглядаються основні функціональні операції суден і моделюються можливі аварійні ситуації. В економічній моделі на основі отриманих у перших двох моделях результатів обчислюється значення цільової функції. Блок-схема математичної моделі проектування суден представлена на рис. 1.

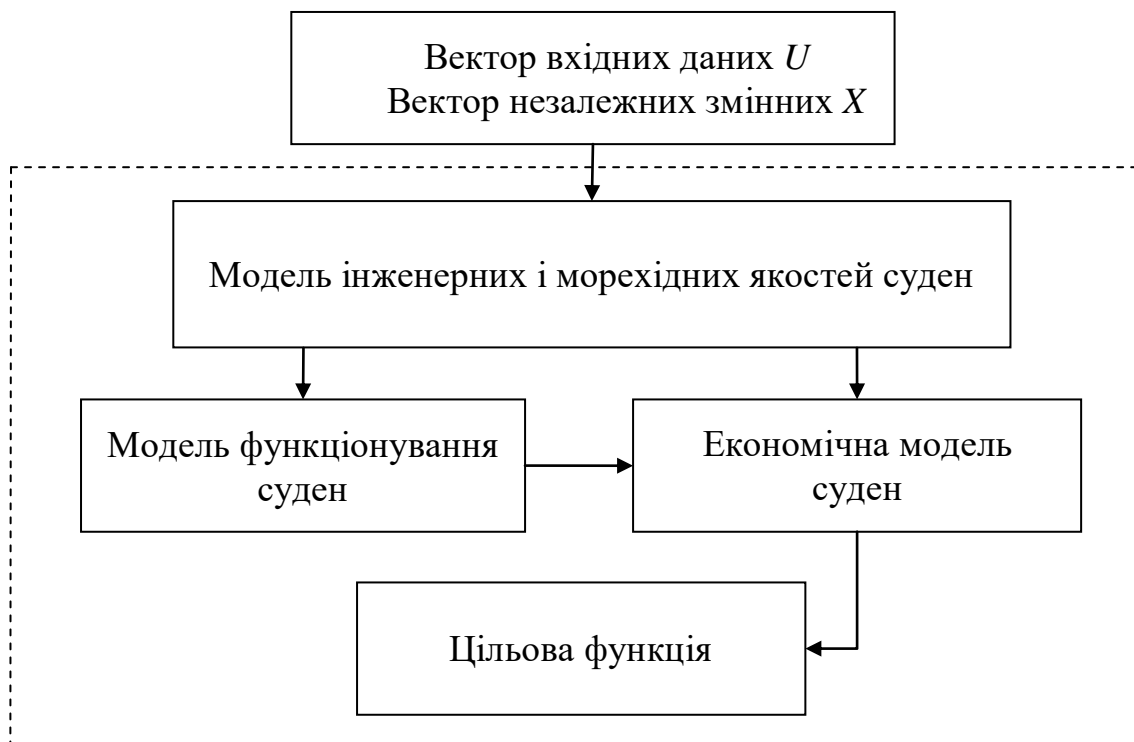


Рисунок 1 – Блок-схема математичної моделі проектування суден

6. Вибрати метод розв'язання задачі оптимізації. Особливості функціонування транспортних суден в сучасних умовах (ціна на паливо, можливі аварійні ситуації, погодні умови в районі плавання і т. д.) не дозволяють використовувати при їх проектуванні детерміновані моделі. У зв'язку з цим при розробці методу визначення оптимальних головних елементів суден необхідно враховувати стохастичний характер вихідної інформації. Це завдання може успішно вирішуватися за допомогою методу імітаційного моделювання.

У даній роботі для пошуку екстремуму цільової функції використовуються метод Пауелла і метод зовнішніх штрафних функцій. Метод Пауелла є одним із прямих методів безумовною оптимізацією, метод зовнішніх штрафних функцій дозволяє перетворити задачу з обмеженнями (задачу умовної оптимізації) в послідовність задач без обмежень (задачу безумовної оптимізації) за допомогою допоміжної штрафної функції.

7. Розробити загальний алгоритм визначення оптимальних головних елементів суден-газовозів LNG. Укрупнена блок-схема алгоритму представлена на рис. 2. Вона складається з трьох блоків: блок вхідних даних; блок математичної моделі проектування суден; блок оптимізації.

У першому блоці формується початкова точка вектору незалежних змінних (початковий стан для оптимізації) і задаються наступні вхідні дані: завдання на проектування; технічні дані; економічні дані; дані для оптимізації. У другому блоці на основі моделі інженерних і морехідних якостей суден, моделі функціонування та економічної моделі суден з використанням методу імітаційного моделювання обчислюються імовірнісні характеристики цільової функції. Третій блок є блоком оптимізації.

Третій розділ присвячено опису алгоритму визначення інженерних і морехідних якостей суден-газовозів LNG, таких як: потужність ГЕУ, складові навантаження мас судна, положення центру ваги, вантажомісткість, посадка, остійність, мінімальний надводний борт, міцність і аварійна посадка судна.

Необхідна потужність ГЕУ визначається за формулою, кВт

$$P_S = \frac{P_D}{\eta_{\Pi}} = \frac{P_E}{\eta_D \eta_{\Pi}},$$

де P_D – потужність, підведена до рушію; P_E – буксирувальна потужність судна; η_D – пропульсивний коефіцієнт; η_{Π} – ККД передачі потужності від двигуна до рушію.

ККД передачі потужності від двигуна до рушію залежить від типу енергетичної установки судна

$$\eta_{\Pi} = \begin{cases} \eta_G \eta_S & \text{для ПТУ} \\ \eta_S & \text{для МОД} \\ \eta_G \eta_S \eta_E \eta_T \eta_A & \text{для DFDE або TFDE,} \end{cases}$$

де $\eta_G = 0,98$ – ККД редуктора; $\eta_S = 0,99$ – ККД валопроводу; $\eta_E = 0,98$ – ККД електродвигуна; $\eta_T = 0,98$ – ККД перетворювача; $\eta_A = 0,97$ – ККД генератора.

Буксирувальна потужність розраховується у вигляді $P_E = R_{Total} v_s$.

Повний опір руху судна обчислюється за формулою, кН:

$$R_{Total} = R_F (1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A + R_{AW} + R_{AA},$$

де R_F – опір тертя; $(1+k_1)$ – коефіцієнт форми корпусу; R_{APP} – опір виступаючих частин; R_W – хвильовий опір; R_B – опір бульба; R_{TR} – опір транця; R_A – кореляційна надбавка; R_{AW} – додатковий опір, спричинений хитавицею судна; R_{AA} – опір повітря.

Складові повного опору R_F , R_{APP} , R_W , R_B , R_{TR} , R_A визначаються за методом Холтропа-Меннена. Додатковий опір R_{AW} визначається за наближеною формулою, наведеною в Довіднику під редакцією Я. І. Войткунського.

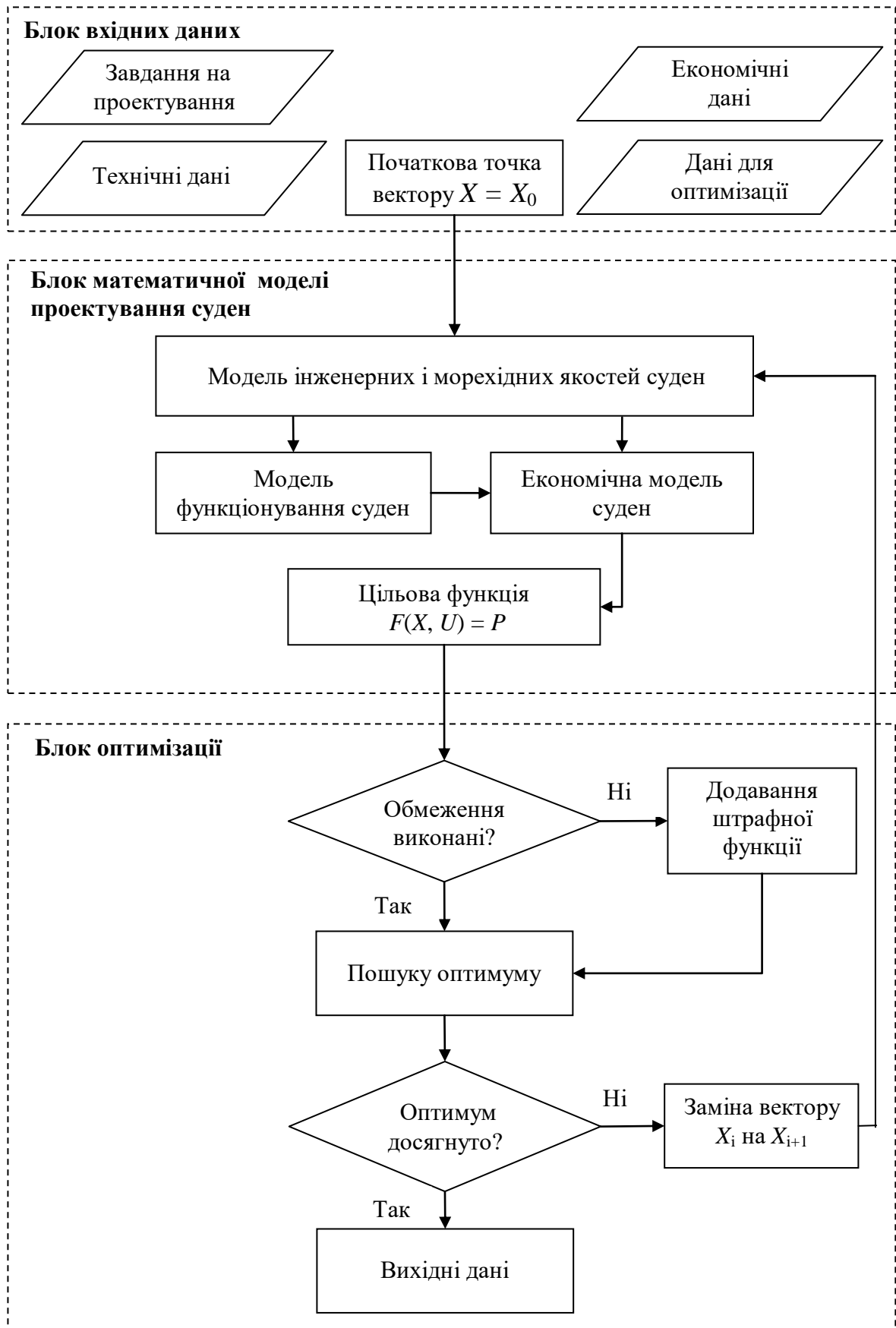


Рисунок 2 – Укрупнена блок-схема алгоритму визначення оптимальних головних елементів суден-газовозів LNG

Опір повітря визначається за формулою, кН:

$$R_{AA} = C_{AA} \frac{\rho_A}{2} v_A^2 A_T,$$

де C_{AA} – коефіцієнт опору повітря; $\rho_A = 1,226 \text{ кг/м}^3$ – щільність повітря; v_A – відносна швидкість повітряного потоку; A_T – поперечна площа парусності, м^2 .

У цій роботі на основі обробки статистичних даних 30 варіантів суден-газовозів LNG здобувачем отримано формули для розрахунку поперечної площі парусності судна-газовоза LNG з двома типами танків.

для судна-газовоза LNG типу Moss

$$A_T = 10,04W^{0,432} \text{ або } A_T = 2,542(H - T)B,$$

для судна-газовоза LNG мембранного типу

$$A_T = 5,234W^{0,471} \text{ або } A_T = 2,273(H - T)B.$$

Водотоннажність судна обчислюється за наступною залежністю:

$$\Delta = D_{\text{пор}} + DW,$$

де $D_{\text{пор}}$ – водотоннажність порожнем; DW – дедвейт судна.

Водотоннажність судна порожнем-газовоза LNG визначається за такою формулою, т:

$$D_{\text{пор}} = P_{\text{к}} + P_{\text{об}} + P_{\text{т.и}} + P_{\text{з.в}} + P_{\text{з.в}},$$

де $P_{\text{к}}$ – маса металевго корпусу; $P_{\text{об}}$ – маса обладнання, включаючи кріогенне обладнання; $P_{\text{т.и}}$ – маса системи вантажних танків; $P_{\text{з.в}}$ – маса енергетичної установки; $P_{\text{з.в}}$ – запас водотоннажності.

Серед складових водотоннажності судна порожнем, маса металевго корпусу і маса устаткування складають значну частину від загальної маси. На основі зібраних статистичних даних здобувачем отримано наступні регресійні залежності для визначення $P_{\text{к}}$ і $P_{\text{об}}$:

для судна-газовоза типу Moss

$$P_{\text{к}} = 0,063LBH - 195,1; P_{\text{об}} = 0,716(LBH)^{2/3} + 2626;$$

для судна-газовоза мембранного типу

$$P_{\text{к}} = 0,058LBH + 2466; P_{\text{об}} = 0,697(LBH)^{2/3} + 2170.$$

Дедвейт судна визначається за формулою, т:

$$DW = P_{\text{г}} + P_{\text{топ}} + P_{\text{топ.о}} + P_{\text{эк}} + P_{\text{доп}} + P_{\text{диф.б}},$$

де $P_{\text{г}}$ – вантажопідйомність судна; $P_{\text{топ}}$ – маса палива для ГД; $P_{\text{топ.о}}$ – маса палива для інших установок; $P_{\text{эк}}$ – маса екіпажу, провізії та постачання; $P_{\text{доп}}$ – додаткова маса, в яку входять змінні рідкі вантажі, запаси масла і котельна вода і т. д.; $P_{\text{диф.б}}$ – маса рідкого баласту.

Координати центру ваги судна знаходяться за формулами:

$$x_g = \frac{\sum_{i=1}^n P_i x_{gi}}{\Delta}; z_g = \frac{\sum_{i=1}^n P_i z_{gi}}{\Delta},$$

де P_i – складові навантаження мас судна, т; x_{gi} , z_{gi} – їх абсциси і аплікати ЦТ, які вимірюються відповідно від площини мідель-шпангоута і основної площини.

На основі обробки даних по 81 судну отримано залежності для визначення вантажомісткості суден-газовозів LNG типу Moss і мембранного типу для судна-газовоза типу Moss

$$W = 0,074(LBH)^{1,134};$$

для судна-газовоза мембранного типу

$$W = 0,055(LBH)^{1,17}.$$

Кут диференту судна обчислюється за формулою

$$\tan \psi = (x_g - x_c) / H_0,$$

де ψ – кут диференту, рад; x_c – абсциса центру величини, м; H_0 – повздовжня метацентрична висота, м.

Розрахунок характеристик остійності судна проводиться згідно з Правилами класифікаційних товариств.

Початкова метацентрична висота обчислюється за формулою

$$h_0 = r_0 + z_c - z_g,$$

де r_0 – поперечний метацентричний радіус, м; z_c – апліката центру величини судна, м.

Плече статичної остійності визначається за формулою Власова-Благовіщенського.

Повздовжня площа парусності і плече парусності визначаються за формулами, отриманими здобувачем шляхом обробки статистичних даних:

для судна-газовоза LNG типу Moss

$$A_v = 5,38W^{0,614} \text{ или } A_v = 1,952(H - T)L; z_v = 1,018H - 0,5T;$$

для судна-газовоза LNG мембранного типу

$$A_v = 9,366W^{0,55} \text{ или } A_v = 1,689(H - T)L; z_v = 0,948H - 0,5T.$$

Мінімально допустима висота надводного борта визначається за Правилами класифікаційних товариств, заснованим на вимогах Міжнародної конвенції про вантажну марку. Судно-газовоз LNG відноситься до суден типу А.

Період бортової хитавиці визначається за виразом:

$$\tau_\theta = 2cB / \sqrt{h_0},$$

где $c = 0,373 + 0,023B / T - 0,043L_{wl} / 100$; L_{wl} – довжина по ватерлінії судна.

У роботі виконано перевірку умови загальної подовжньої міцності судна по нормальному напруженні в міделевому перерізі. Загальна поздовжня міцність судна вважається забезпеченою за умови виконання наступної вимоги:

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W} \cdot 10 \leq [\sigma].$$

Повне значення згинального моменту M складається з згинального моменту на тихій воді M_{sw} і хвильового згинального моменту M_w , які визначаються за наближеними формулами. Розрахунок еквівалентного бруса виконується в залежності від типу конструктивного мідель-шпангоута. В роботі розглянуто два типи конструктивних мідель-шпангоутів суден-газовозів LNG.

Також у роботі виконано перевірку аварійної остійності судна-газовоза LNG при несиметричному затопленні з'єднаних між собою бортових цистерн і міждонних відсіків за максимальними розмірами розрахункової довжини пошкоджень корпусу, передбаченими Кодексом IGC.

Розрахунок аварійної посадки судна проводиться в два етапи. На першому етапі методом прийому вантажу визначається остійність судна при затопленні міждонних відсіків у припущенні, що між боровими цистернами і міждонними відсіками встановлюються перегородки. На другому етапі методом постійної водотоннажності визначається остійність судна при затопленні бортових цистерн. Потім підсумовуються отримані результати двох попередніх етапів.

Особливістю запропонованої моделі є те, що передбачена можливість розрахунку характеристик суден-газовозів LNG льодового плавання, таких як: потужність головних двигунів судна, маса конструкцій льодових підсилень, вантажомісткість судна, остійність судна з урахуванням обмерзання і втрата швидкості в льодових умовах.

Четвертий розділ присвячено формулюванню і вирішенню задачі функціонування суден-газовозів LNG.

Транспортна операція судна-газовоза LNG – типовий круговий рейс, при якому природний газ перевозиться з порту відправлення в порт призначення, на зворотному шляху приймається на судно водяний баласт. До складу основних функціональних операцій судна-газовоза LNG відносяться: навантажувальна операція, транспортування вантажу в порт призначення, розвантажувальна операція і баластний перехід в порт відправлення.

Вантажна операція в порту включає:

- M_1 : підхід до порту (завершення зворотного переходу – порт відправлення), супровід ескортним буксиром,
- M_2 : швартування буксирами-кантовщиками (прихід у порт відправлення – завершення швартування),
- M_3 : підготовка до навантаження (з'єднання трубопроводів, охолодження тощо), початок чергування пожежного судна,
- M_4 : навантаження (початок навантаження – завершення навантаження),
- M_5 : підготовка до відходу (роз'єднання трубопроводів, отримання судових документів і т. д.), кінець чергування пожежного судна,
- M_6 : відхід від причалу (порт відправлення – початок рейсу), супровід буксирами-кантовщиками і ескортним буксиром.

Випадкова тривалість вантажної операції визначається за формулою:

$$t_{\text{пор.оп.}} = t_{M_1} + t_{M_2} + t_{M_3} + t_{M_4} + t_{M_5} + t_{M_6},$$

де $t_{\text{пор.оп.}}$ – тривалість вантажної операції, діб; $t_{M_1} \dots t_{M_6}$ – відповідна тривалість складових вантажної операції в порту відправлення, діб.

Випадкова тривалість розвантажувальної операції визначається аналогічно:

$$t_{\text{разг.оп.}} = t_{N_1} + t_{N_2} + t_{N_3} + t_{N_4} + t_{N_5} + t_{N_6},$$

де $t_{\text{разг.оп.}}$ – тривалість розвантажувальної операції, діб; $t_{N_1} \dots t_{N_6}$ – тривалість підходу до порту призначення, швартування, підготовки до розвантаження, розвантаження, підготовки до відходу, відходу від порту призначення.

Перші імовірнісні характеристики тривалості транспортування вантажу і баластного переходу визначаються у вигляді:

$$t_{\text{тр}} = S / (v_s - \Delta v_s); t_{\text{бал}} = S / (v_s^* - \Delta v_s^*),$$

де $t_{\text{тр}}$ – тривалість транспортування вантажу, дїб; $t_{\text{бал}}$ – тривалість баластного переходу, дїб; S – відстань між портами, миль; v_s, v_s^* – середня швидкість судна в вантажу і баласті, вуз; $\Delta v_s, \Delta v_s^*$ – відповідно середні втрати швидкості на хвилюванні, вуз.

При використанні методу імітаційного моделювання середнє значення втрати швидкості судна на хвилюванні визначається за емпіричною формулою, рекомендованою Регістром Ллойда:

$$\Delta v / v = 50(h_{1/3} / L)^2 [Fr^{-1} - 3(h_{1/3} / L)^{1/4}],$$

де $h_{1/3} = 0,75h_{3\%}$ – висота «значних» хвиль.

У зв'язку з тим, що зазвичай судна-газовози LNG перевозять вантажі за довгостроковими контрактами, то для таких суден відсутні простои через брак замовлень. Середня тривалість річного продуктивного періоду судна $T_{\text{п.п}}$ визначається за формулою:

$$T_{\text{п.п}} = 365 - T_{\text{т.рем}} - T_{\text{к.рем}} - T_{\text{авар.рем}},$$

де $T_{\text{т.рем}}, T_{\text{к.рем}}, T_{\text{авар.рем}}$ – середні часи поточного, капітального та аварійного ремонтів на рік, дїб.

Під час кругового рейсу суден-газовозів LNG можливі різні аварії. За час експлуатації газозовів протягом 1964-2010 рр. відбулося 158 аварійних ситуацій, що поділяються на вісім типів: зіткнення (19), посадка на мілину (8), дотик (8), пожежа (10), несправність обладнання і механізмів (55), важкі погодні умови (9), аварія при навантаженні і розвантаженні (22) і несправність системи управління вантажем (27). Аварії, що виникають при експлуатації суден-газовозів LNG завершуються ремонтом. Схема основних операцій кругового рейсу судна наведена на рис. 3.

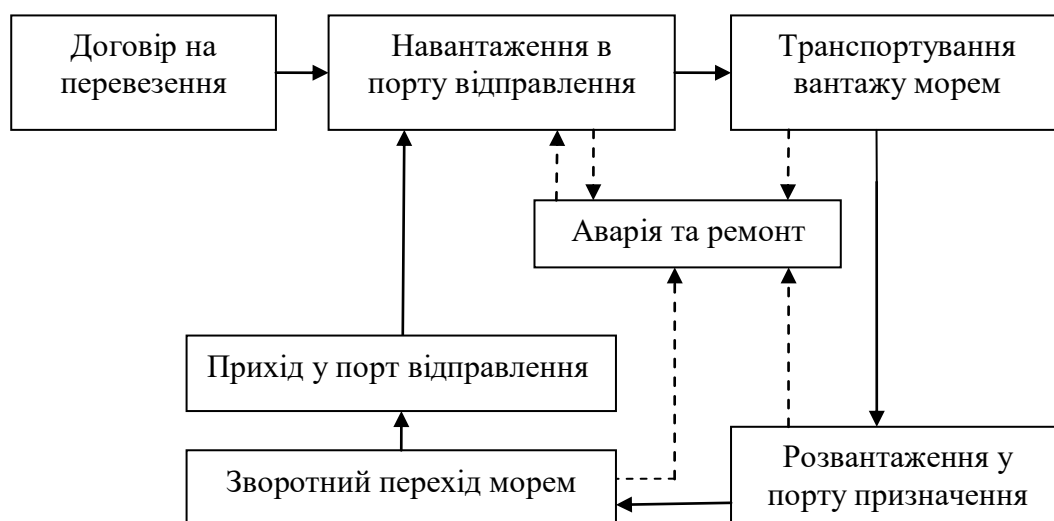


Рисунок 3 – Схема основних операцій кругового рейсу судна-газовоза LNG

Час аварійного ремонту на рік визначається за формулою:

$$T_{\text{авар.рем}} = \sum_{i=1}^8 n_{\text{авар}i} \overline{t_{\text{авар.рем}i}},$$

де $n_{\text{авар}i}$ – кількість аварій i -го типу на рік; $\overline{t_{\text{авар.рем}i}}$ – середній час аварійного ремонту аварії i -го типу, діб. Тривалість аварійного ремонту і зазначена тривалість поточного і капітального ремонту визначаються за даними судноремонтних заводів.

Перед виходом судна в море перевіряються гідрометеорологічні умови в районі експлуатації. Якщо погодні умови не є придатними для виходу в море, наприклад шторм, то судно буде відстоюватися в порту до поліпшення погоди. У даній роботі критерієм гідрометеорологічних умов є $h_{3\%}$ – висота хвилі 3% забезпеченості.

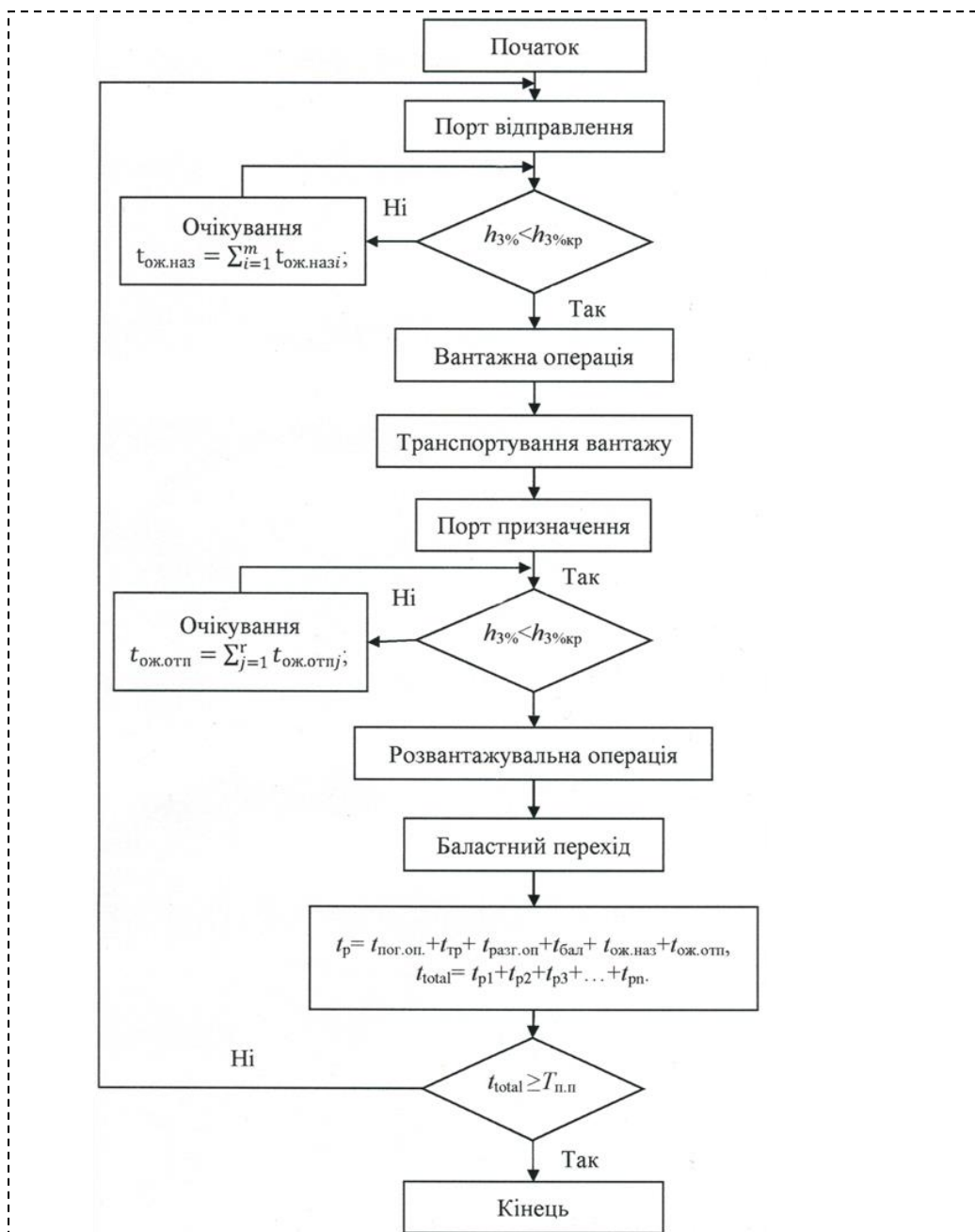


Рисунок 4 – Блок-схема моделі функціонування судна-газовоза LNG

Тривалість очікування в порту визначається за формулою (з урахуванням можливості появи декількох штормів поспіль): $t_{\text{ож}} = \sum_{i=1}^m t_{\text{ож}i}$, де $t_{\text{ож}i}$ – тривалість i -го шторму, яка знаходиться за результатами обробки гідрометеорологічних даних району експлуатації судна; m – кількість штормів. Тривалість очікування поділяється на два типи: $t_{\text{ож.наз}}$ – тривалість очікування в порту призначення, $t_{\text{ож.отп}}$ – тривалість очікування в порту відправлення.

На основі аналізу вищевказаних основних функціональних операцій судна-газовоза LNG створено модель функціонування судна (рис. 4). Параметри цієї моделі поділяються на детерміновані і випадкові. До детермінованих параметрів відноситься, наприклад, відстань між портами. Випадковими параметрами є наступні величини:

– висота хвилі 3% забезпеченості $h_{3\%}$, величина якої залежить від району експлуатації судна. Функція розподілу $h_{3\%}$ підпорядковується логнормальному закону. Судно виходить у море лише за умови, коли $h_{3\%}$ в районі експлуатації менше критичної висоти хвилі 3% забезпеченості $h_{3\%кр}$ для судна;

– кількість аварій i -го типу в рік, яка підпорядковується розподілу Пуассона. Розподіл Пуассона являє собою імовірнісний розподіл дискретного типу, функція ймовірності визначається як:

$$P(X = k) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^k}{k!}, k = 0, 1, 2, \dots,$$

де k – цілі невід'ємні числа; e – основа натурального логарифма; λ – параметр, що характеризує інтенсивність подій. В задачі визначення кількості аварій i -го типу, величина λ дорівнює частоті аварій;

– планова тривалість поточного, капітального та аварійного ремонтів, які підпорядковуються рівномірному розподілу;

– тривалість шторму, яка підпорядковується експоненціальному розподілу.

П'ятий розділ присвячено визначенню економічних показників суден-газовозів LNG як випадкових величин.

В економічній моделі судна багато параметрів таких як ціна на сталь, ціна на паливо, фрахтова ставка вантажу і т. д. мають випадковий характер, вони коливаються в залежності від кон'юнктури ринку. У даній роботі значення цих параметрів розглядаються як випадкові величини, а їх значення моделюються методом імітаційного моделювання.

Випадкова величина будівельної вартості судна визначається за формулою:

$$C_c = C_{\text{п}} + C_{\text{пр}},$$

де $C_{\text{п}}$ – вартість побудови судна; $C_{\text{пр}}$ – вартість проектування судна.

У загальному вигляді вартість побудови судна визначається за наступним виразом:

$$C_{\text{п}} = C_{\text{к}} + C_{\text{об}} + C_{\text{т.и}} + C_{\text{эу}} + C_{\text{р}},$$

де $C_{\text{к}}, C_{\text{об}}, C_{\text{т.и}}, C_{\text{эу}}, C_{\text{р}}$ – вартість металевих корпусу, обладнання, системи вантажних танків, ЕУ і робіт.

Випадкова величина експлуатаційних витрат судна за життєвий цикл обчислюється за формулою:

$$C_{\text{эк}} = C_{\text{пос}} + C_{\text{топ}} + C_{\text{порт}},$$

де $C_{\text{пос}}$ – постійні експлуатаційні витрати; $C_{\text{топ}}$ – витрати на паливо; $C_{\text{порт}}$ – портові збори.

Постійні експлуатаційні витрати судна за життєвий цикл обчислюються за формулою:

$$C_{\text{пос}} = (E_{\text{ам}} + E_{\text{рем}} + E_{\text{сн}} + E_{\text{стр}} + E_{\text{эк}})T_{\text{life}},$$

де $E_{\text{ам}}, E_{\text{рем}}, E_{\text{сн}}, E_{\text{стр}}, E_{\text{эк}}$ – річні амортизаційні відрахування, витрати на ремонт і обслуговування, витрати на постачання, страхова премія і витрати на утримання екіпажу.

Витрати на паливо займають досить значну частину експлуатаційних витрат судна. Витрати на паливо за життєвий цикл судна визначаються наступним чином:

$$C_{\text{топ}} = c_{\text{топ}} g_{\text{см}} \cdot \sum_{i=1}^{n_T} e_{\text{топ}i},$$

де $c_{\text{топ}}$ – вартість 1 т палива; $g_{\text{см}} = 1,02 \div 1,04$ – коефіцієнт, який враховує витрати мастильних матеріалів; $e_{\text{топ}i}$ – маса палива, що витрачається за i -й круговий рейс; n_T – кількість рейсів за життєвий цикл судна.

Основні портові збори $C_{\text{порт}}$ включають корабельний, причальний, лоцманський, буксирний, вантажний, маяковий.

Випадкова величина загальної прибутку від експлуатації суден-газовозів LNG визначається за формулою:

$$P = I - C = n_{\text{LNG}} (I^* - C_c - C_{\text{эк}}) = n_{\text{LNG}} \left(\sum_{i=1}^{T_{\text{Life}}} f \cdot Q_i - C_c - C_{\text{эк}} \right),$$

де P, I, C – загальний прибуток, доходи та витрати від експлуатації суден за весь термін служби; I^* – доходи від експлуатації одного судна за весь термін служби, дол.; f – фрахтова ставка вантажу, дол./т; Q – обсяг поставок в i -му році, т.

У шостому розділі проведено перевірку адекватності та чутливості розробленої ММПС, виконано оцінку похибки результатів оптимізації. Наведено результати розв'язання оптимізаційної задачі визначення головних елементів суден-газовозів LNG.

На основі створених алгоритмів оптимізації головних елементів суден-газовозів LNG розроблено програмний комплекс "LNG_carriers" в середовищі програмування Delphi.

Адекватність ММПС перевірено шляхом порівняння отриманих результатів з даними побудованих суден або розроблених проектів. У результаті встановлено, що середня похибка не перевищує 5%. Серед незалежних змінних найбільший вплив на цільову функцію мають довжина і висота борту судна. У роботі розглянуто різні типи похибок, сумарна похибка результатів оптимізації становить 5,42%.

Як приклади можливого використання програмного комплексу розглянуто три маршрути поставок природного газу: Бетіуа (Алжир) – Порт Південний (Україна); Тангу (Індонезія) – Путянь (Китай); Сабетта (Росія) – Шанхай (Китай) і Зебрюге (Бельгія). Судна-газовози LNG, що перевозять природний газ по третьому маршруту, є суднами льодового класу. У літньо-осінню навігацію судна ходять між Сабеттою і Шанхаєм, а в зимово-весняну – судна перевозять вантажі із Сабетти до Зебрюге. У таблиці представлено отримані результати оптимізації.

Таблиця – Результати розв’язання оптимізаційної задачі

Найменування показника	Характеристики суден, що експлуатуються на лінії (або близький проект)			Оптимальні варіанти отриманих розв’язків оптимізаційної задачі		
	Бетіуа – Порт Південний	Тангу – Путянь	Сабетта – Шанхай і Зебрюге	Бетіуа – Порт Південний	Тангу – Путянь	Сабетта – Шанхай і Зебрюге
Довжина судна, м	268,00	274,10	287,00	282,50	335,68	291,67
Ширина судна, м	43,00	43,35	50,00	43,93	49,36	43,90
Висота борту судна, м	26,00	26,25	23,60	25,94	26,70	26,96
Осадка судна, м	11,40	11,45	11,70	11,46	10,91	11,47
Коефіцієнт загальної повноти	0,739	0,750	0,726	0,738	0,780	0,770
Швидкість ходу, вуз.	19,7	19,50	19,50	19,08	18,59	20,50
Кількість суден у флоті, од.	2	2	2	2	1	2
Дедвейт, т	70000	73050	85000	75284	102127	78747
Вантажомісткість, м ³	140207	147237	172600	152906	221772	167160
Водотоннажність, т	99500	104789	125100	107080	143309	118149
Потужність головного двигуна, кВт	27940	27300	45000	29400	32400	39900
Будівельна вартість судна, млн дол.	193,00	205,50	316,00	207,84	265,86	293,00
Загальна прибуток від експлуатації суден за весь термін служби, млн дол.	656*	461*	517*	788	545	582

* – Визначені при тих же фрахтових ставках, що і оптимальні варіанти

ВИСНОВОК

У дисертаційній роботі отримано теоретичне рішення актуальної задачі удосконалення процесу проектування суден-газовозів LNG – збільшення проектних характеристик ефективності побудови та експлуатації таких суден в результаті використання методів теорії ймовірностей для опису процесів їх функціонування і ринкових критеріїв оцінки продуктивності. Цей результат досягнуто за допомогою розробки нового методу визначення оптимальних головних елементів суден та їх

складу флоту для транспортування необхідного обсягу поставок газу між заданими портами. На основі розробленого здобувачем методу створено програмний комплекс, за допомогою якого вирішені практичні задачі оптимізації характеристик суден та необхідної їх кількості для різних маршрутів як регіональних поставок газу, так і для міжрегіонального його транспортування морем.

Основні результати дисертаційної роботи, що характеризують її наукову новизну і практичну цінність, полягають у наступному:

1. З метою вдосконалення проектування суден-газовозів LNG і забезпечення найбільш актуальних на сьогоднішній день поставок зрідженого природного газу морем, процес формування задач визначення оптимального складу флоту таких суден-газовозів і їх оптимальних головних елементів переведений з детермінованої на імовірнісну основу та до використання ринкових критеріїв ефективності.

2. За допомогою створеної оригінальної бази даних більш ніж 80 проектів суден-газовозів LNG, побудованих з 1969 по 2015 рр. та аналізу їх головних елементів і характеристик отримано нові регресійні залежності, що дозволяють наближено визначити головні елементи таких суден і сформувані початкові значення головних розмірів в процесі пошуку оптимального розв'язку задачі їх проектування.

3. На основі цих залежностей та нових досягнень гідроаеродинаміки суден розроблено нову модель інженерних і морехідних якостей суден-газовозів LNG, в якій обчислюються масо-габаритні показники, місткість, плавучість і ходовість, що забезпечують його продуктивність і економічну ефективність, а також остійність, міцність, аварійна посадка і морехідність, що визначають рівень безпеки плавання.

4. Сформульовано оптимізаційну задачу визначення головних елементів суден-газовозів LNG, розглянуто питання вибору незалежних змінних, вхідних даних і критеріїв оптимальності. Розроблено систему тривіальних та функціональних обмежень, відповідно до умов експлуатації і побудови суден, вимог сучасних міжнародних морських конвенцій та існуючих правил Класифікаційних товариств.

5. На основі аналізу основних функціональних операцій суден-газовозів LNG і можливих аварійних ситуацій при експлуатації суден, вперше розроблено стохастичну модель функціонування суден-газовозів LNG, що дозволяє розглянути їх основні функціональні операції і визначити фактори надійності і ефективності суден такого типу. При вирішенні задачі функціонування суден-газовозів LNG використано теорію перетворення випадкових функцій та імітаційне моделювання, які дозволяють врахувати вплив реальних факторів, що супроводжують експлуатацію суден.

6. На основі використання сучасної системи оцінки ринкової вартості розроблено економічну модель суден-газовозів LNG, в якій визначаються вартість побудови судна, його експлуатаційні витрати, можливі фрахтові ставки, доходи, прибуток, термін окупності та інші показники, що дозволяють досить повно визначити дійсний рівень корисності проекту.

7. Розроблено програмний комплекс "LNG_carriers", який призначений для визначення оптимальних головних елементів суден-газовозів LNG і складу суден

флоту, що забезпечують доставку природного газу між заданими портами з максимальним економічним ефектом.

8. З метою апробації розробленого методу на вирішенні практичних завдань виконано визначення оптимальних, за техніко-економічними показниками, головних елементів судна-газовоза LNG, і також кількості суден цього типу, які забезпечують заданий вантажопотік зрідженого природного газу на різних лініях.

Достовірність теоретичних і прикладних результатів, висновків дисертаційної роботи забезпечується коректною постановкою задач функціонування та визначення головних елементів суден-газовозів LNG, коректним використанням методів теорії корабля, теорії проектування суден, апарату імітаційного моделювання і нелінійного програмування, порівнянням і близькістю результатів, отриманих автором за допомогою розробленого методу, з аналогічними даними за існуючими технічними проектами суден вказаного типу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці, які відображають основні наукові результати дисертації:

1. **Дун Синьшо.** Анализ современного состояния и пути совершенствования метода определения характеристик судов-газовозов LNG [Текст] / Дун Синьшо // 3б. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2014. – № 5. – С. 12–16. [фахове видання України].

2. **Дун Синьшо.** Регрессионные зависимости для определения главных размерений судов-газовозов LNG на начальных стадиях проектирования [Текст] / Дун Синьшо // 3б. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2014. – № 6. – С. 4–8. [фахове видання України].

3. **Дун Синьшо.** Модель функционирования судна-газовоза LNG [Текст] / Дун Синьшо // 3б. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2015. – № 1. – С. 18–20. [фахове видання України, входить в наукометричну базу РІНЦ].

4. **Дун Синьшо.** Определение нагрузки масс судов-газовозов LNG на начальных стадиях проектирования [Текст] / Дун Синьшо // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. – Астрахань: АГТУ, 2015. – № 4. – С. 16–22. [входить до переліку фахових видань ВАК Росії, в наукометричну базу РІНЦ].

5. **Дун Синьшо.** Определение площади и плеча парусности судна-газовоза LNG [Текст] / Дун Синьшо // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород: НГТУ, 2015. – № 4. – С. 218–221. [входить в наукометричну базу РІНЦ].

6. **Дун Синьшо.** Зависимости для определения грузместимости газозовов LNG со сферическими вкладными и мембранными танками на начальных стадиях проектирования [Текст] / Дун Синьшо // 3б. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2015. – № 4. – С. 64–67. [фахове видання України, входить в наукометричну базу РІНЦ].

7. **Дун Синьшо.** Определение оптимальных главных элементов судов-газовозов LNG [Текст] / Дун Синьшо // 3б. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2016. – № 1. – С. 3–15. [фахове видання України, входить в наукометричну базу РІНЦ].

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

8. **Дун Синьшо.** Анализ современного состояния строительства судов-газовозов LNG [Электронный ресурс] / Дун Синьшо // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: матеріали Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнародною участю. 21–23 травня 2014 р. – Миколаїв: НУК, 2014. – Режим доступа: <http://conference.nuos.edu.ua/catalog>.

9. **Дун Синьшо.** Построение модели функционирования судна-газовоза LNG [Текст] / Дун Синьшо // Україна на шляху в Європу. Вища освіта та євроінтеграція. II Всеукраїнська наукова конференція. – м. Миколаїв, 6–7 грудня 2014 р. – Миколаїв: НУК, 2014. – С. 265–267.

10. **Дун Синьшо.** Зависимости для определения водоизмещения порожнем судов-газовозов LNG на начальной стадии проектирования [Текст] / Дун Синьшо // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: матеріали Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнародною участю. 20–22 травня 2015 р. – Миколаїв: НУК, 2015. – С. 51–52.

11. **Некрасов, В.А.** Совершенствование метода определения оптимальных главных элементов судов-газовозов LNG на начальных стадиях проектирования [Текст] / В.А. Некрасов, Дун Синьшо // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. – м. Миколаїв, 19–20 травня 2016 р. – Миколаїв: НУК, 2016. – С. 9–16.

12. **Дун Синьшо.** Метод определения оптимальных главных элементов судов-газовозов LNG на начальных стадиях проектирования [Текст] / Дун Синьшо // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті: матеріали VIII Міжнар. наук.-практ. конф., 24–26 травня 2016 р. – Херсон: MINTT, 2016. – С. 225–228.

Основні матеріали дисертації достатньо повно відображені у наукових фахових виданнях, а самі видання відповідають профілю спеціальності та дисертації. З робіт, опублікованих у співавторстві, у дисертації використані тільки ті результати, які були одержані аспірантом особисто.

АНОТАЦІЯ

Дун Сіншо. Визначення оптимальних головних розмірів судна-газовоза для перевезення зріджених газів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.08.03. – Конструювання та будівництва суден. – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2016.

Метою дисертаційної роботи є удосконалення процесу проектування суден-газовозів LNG на основі створення сучасного методу визначення на початкових стадіях їх проектування головних елементів цих суден, оптимальних за техніко-економічними показниками.

Сформульовано оптимізаційну задачу визначення головних елементів суден-газовозів LNG. Розроблено математичну модель проектування суден, яка розділена на три взаємопов'язаних моделі: модель інженерних і морехідних якостей суден;

стохастична модель функціонування суден і економічна модель суден. При вирішенні задачі функціонування суден-газовозів LNG використано теорію перетворення випадкових функцій та імітаційне моделювання. Система обмежень задачі сформована за допомогою методу зовнішньої точки. Для пошуку екстремуму цільової функції застосовано метод спряжених напрямків.

Розроблено новий програмний комплекс "LNG_carriers", що забезпечує реалізацію нового підходу до вибору кількості суден-газовозів LNG для транспортування газу між заданими портами, їх головних елементів на початкових стадіях проектування.

Ключові слова: судно-газовоз LNG, головні елементи, оптимізаційна задача, математична модель проектування суден, метод Пауелла, метод зовнішніх штрафних функцій, задача функціонування суден, імітаційне моделювання.

АННОТАЦИЯ

Дун Синьшо. Определение оптимальных главных размерений судна-газовоза для перевозки сжиженных газов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.03. – Конструирование и постройка судов. – Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, 2016.

Целью диссертационной работы является совершенствование процесса проектирования судов-газовозов LNG на основе создания современного метода определения на начальных стадиях проектирования главных элементов этих судов, оптимальных по технико-экономическим показателям.

Теоретической и методологической основой исследования являются теория корабля, теория проектирования судов и доступная документация по проектам судов-газовозов LNG. Для получения зависимостей и формул определения главных элементов судов-газовозов LNG использованы методы регрессионного анализа. При решении задач функционирования судов-газовозов LNG использованы теория преобразования случайных функций и имитационное моделирование, позволяющие выполнять комплексную оценку эффективности и надежности судов с учетом влияния реальных факторов, сопровождающих эксплуатацию судов. Система ограничений задачи сформирована с помощью метода внешних штрафных функций. Для поиска экстремума целевой функции применен метод Пауэлла.

В диссертации проведен анализ архитектурно-конструктивных особенностей судов-газовозов LNG и их классификации, создана база данных по более 80 проектам судов-газовозов LNG, построенных с 1969 по 2015 г. Получена новая совокупность регрессионных уравнений, которая позволяет приближенно определить главные элементы таких судов и которая используется для формирования исходных значений главных размерений в процессе поиска оптимального решения задачи их проектирования.

Сформулирована оптимизационная задача определения главных элементов судов-газовозов LNG, рассмотрены вопросы выбора независимых переменных, входных данных и системы ограничений. Значение целевой функции вычисляется в математической модели проектирования судов, которая разделена на три взаимосвязанных модели: модель инженерных и мореходных качеств судов, модель

функционирования судов и экономическая модель судов. Отмечается, что определение оптимальных главных элементов судов-газовозов LNG является задачей нелинейного программирования со стохастическими исходными данными.

Разработана модель инженерных и мореходных качеств судна-газовоза LNG, в которой вычисляются массо-габаритные показатели, вместимость, плавучесть и ходкость, обеспечивающие его продуктивность и экономическую эффективность, а также остойчивость, прочность, аварийная посадка и мореходность, определяющие уровень безопасности плавания.

На основе рассмотрения всей совокупности операций по эксплуатации судна-газовоза LNG и возможных аварийных ситуаций при эксплуатации судна, разработана модель его функционирования, которая включает в себя основные функциональные операции такого судна, позволяющие достаточно полно отразить факторы надежности и эффективности его использования.

Усовершенствован метод определения экономических показателей, показателей продуктивности и надежности судна-газовоза LNG, в которые входят строительная стоимость судна, его эксплуатационные расходы, возможные фрахтовые ставки, доходы, прибыль, срок окупаемости и другие, позволяющие достаточно полно определить действительный уровень полезности проекта.

Разработан новый программный комплекс "LNG_carriers", обеспечивающий реализацию принципиально нового подхода к выбору количества судов-газовозов LNG для транспортировки газа между заданными портами, их главных элементов на начальных стадиях проектирования.

С целью апробации разработанного метода на решении практических задач выполнено определение оптимальных по технико-экономическим показателям главных элементов судов-газовозов LNG, и также количества судов этого типа, обеспечивающих морской грузопоток сжиженного природного газа на линиях: Бетиуа (Алжир) – Порт Южный (Украина); Тангу (Индонезия) – Путянь (Китай); Сабетта (Россия) – Шанхай (Китай) и Зебрюгге (Бельгия).

Ключевые слова: судно-газовоз LNG, главные элементы, оптимизационная задача, математическая модель проектирования судов, метод Пауэлла, метод внешних штрафных функций, задачи функционирования судов, имитационное моделирование.

THE SUMMARY

Dong Xinshuo. The Determination of main dimensions of gas carriers for transportation of liquefied gas. – Manuscript.

The Dissertation for an academic degree of the Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.08.03. – Design and building of ships. – Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev, 2016.

The purpose of the dissertation is to improve the process of LNG carrier design on the basis of devising a modern method to determining the main dimensions of LNG carriers in the initial stages of design. The method is reduced to solving the nonlinear optimization problem with techno-economic criteria.

An optimization problem for determining the main dimensions of LNG carriers was formulated. A ship design mathematical model (SDMM) was created to calculate the value of the optimality criterion. The SDMM can be divided in three interconnected models:

ship performance model, ship functioning model and ship economic model. The main ship operations, possible emergencies during operations and the influence of random factors on the economic performance of LNG carriers were studied using the theory of random functions and the simulation modeling method. The optimization problem with constraints was solved using the exterior penalty function method. The extremum of the objective function was found with the help of the Powell's method.

On the basis of the developed method the software «LNG Carriers» in Delphi was created, which can determine the optimal number of LNG carriers and their main dimensions for transportation of liquefied natural gas between the given ports.

Keywords: LNG carrier, main dimensions, optimization problem, ship design mathematical model, Powell's method, exterior penalty function method, ship's functional task, simulation modeling.

Замовлене. Підписано до друку 20.09.2016. Формат 60×90/16.
Папір офсетний. Друк трафаретний. Гарнітура «Таймс».
Ум. дрку. арк. 1,5. Обл.-вид. арк. 1,0.
Наклад 100 прим. **Замовлення № 320.**

Надруковано в друкарні ПП «РАЛ-поліграфія».
54052, Миколаїв, пр. Корабелів, 2/2,
тел. (0512) 67-08-28, ел. пошта: gal.print@gmail.com
Свідоцтво про держ. реєстрацію ДК № 2850 від 15.05.2007 р.