

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

Цимбал Марія Миколаївна



УДК 656.61.052

**РОЗРОБКА МЕТОДУ РЕЙСОВОГО ПЛАНУВАННЯ
ОПТИМАЛЬНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ КОНТЕЙНЕРОВОЗУ**

Спеціальність 05.22.13 - навігація та управління рухом

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті «Одеська морська академія»
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Волков Олександр Миколайович,
доцент кафедри «Судноводіння»
Національного університету
«Одеська морська академія», м. Одеса

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Тимощук Олена Миколаївна
директор Київського інституту водного
транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-
Сагайдачного Державного університету
інфраструктури та технологій, м. Київ

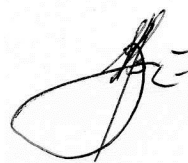
кандидат технічних наук, професор
Бондаренко Олександр Валентинович
директор кораблебудівного навчально-наукового
інституту, Національний університет
кораблебудування ім. адмірала Макарова,
м. Миколаїв

Захист відбудеться 24 березня 2021 р. о 14:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.106.01 в Національному університеті «Одеська морська академія» за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона 8, корп. 1, зал засідань вченої ради.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету «Одеська морська академія» за адресою: м. Одеса, вул. Дідріхсона 8, корп. 2, та за електронною адресою: <http://onma.edu.ua/zakhist-dissertatsiy>.

Автореферат розісланий 23 лютого 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради, Д 41.106.01
д. т. н., професор



Нікольський В.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підвищення безаварійності судноводіння являється однією із найважливіших проблем безпеки мореплавання, вирішення якої сприяє зниженню шкоди навколишньому середовищу та покращенню охорони людського життя на морі. Одним із суттєвих аспектів згаданої проблеми є забезпечення морехідної безпеки суден. До основних проблем, присвячених безпечному судноплавству, входять питання забезпечення належного технічного стану судна, якості складання вантажного плану, організації суднової вахтової служби і забезпечення морехідного стану судна з урахуванням завантаження.

Ряд питань безпеки мореплавання вимагає постійного дослідження у відповідності з сучасними запитами торгового флоту. До таких питань відноситься забезпечення морехідного стану судна, яке у визначальній мірі залежить від коректності його завантаження.

Під час завантаження контейнеровозу вантаж слід розміщувати з урахуванням послідовності портів вивантаження, забезпечуючи вільний доступ до необхідних партій вантажу в портах призначення, а також враховувати, що проміжні стани завантаження повинні відповідати вимогам морехідної безпеки судна, а виникаючі сили інерції мають знаходитись в допустимих межах.

Таким чином, забезпечення морехідної безпеки контейнеровозів, чому присвячена дана робота, є актуальним і перспективним науковим напрямом.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Для виконання роботи були використані положення Транспортної стратегії України на період до 2020 р. (розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 р., №2174-р), рішення Ради національної безпеки і оборони України від 16.05.2008 р. «Про заходи щодо забезпечення розвитку України як морської держави» (указ Президента України від 20.05.2008 р. №463 / 2008), а також робота виконувалася в рамках планів наукових досліджень національного університету «Одеська морська академія» за держбюджетною темою «Розвиток інтегрованої системи функціонування спеціалізованого флоту в умовах нестабільності» (№ ДР 0117U000314, 2017 - 2021 рр.), в якій здобувач виконав окремий підрозділ.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційного дослідження являється підвищення морехідної безпеки суден шляхом розробки методу рейсового планування оптимального завантаження контейнерів. Головна задача дослідження полягає в розробці алгоритмів визначення оптимального завантаження контейнеровозів.

Наукова гіпотеза дисертаційного дослідження полягає у допущенні можливості формування рейсового планування оптимального завантаження контейнеровозу, яке мінімізує прийом баласту та сили інерції хитавиці судна.

Для вирішення головної задачі дисертації методами теорії дослідження операцій було проведено її декомпозицію на три незалежні складові задачі:

1. Забезпечення вимог морехідної безпеки судна при розміщенні партій контейнерів завантаження.

2. Врахування доступності партій контейнерів при формуванні завантаження судна.

3. Залежність сил інерції хитавиці від завантаження судна.

Об'єктом дослідження дисертації є морехідна безпека суден.

Предметом дослідження являються методи оптимального завантаження суден.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених в роботі задач було використано наступні методи:

- системного аналізу для визначення тематики дисертаційного дослідження та обґрунтування його методологічного забезпечення;

- дослідження операцій для декомпозиції головної задачі дисертації на складові задачі;

- теоретичної механіки для формалізації виникаючих сил інерції під час хитавиці судна;

- математичного програмування для формування оптимального завантаження судна контейнерами.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в розробці нового методу формування рейсового планування оптимального завантаження контейнеровозу згідно ротації портів призначення, що має комп'ютерну реалізацію і відрізняється мінімізацією кількості прийому баласту та сил інерції хитавиці судна.

У дисертаційній роботі:

- вперше розроблений спосіб визначення контейнеру, на який діє максимальна сила інерції хитавиці, в залежності від завантаження судна для оцінки морехідної безпеки судна;

- вперше запропонована процедура забезпечення доступності партій контейнерів в порту їх призначення для формування рейсового вантажного плану судна;

- одержали подальший розвиток методи забезпечення вимог морехідної безпеки судна шляхом оптимального розміщення партій контейнерів завантаження для прийому мінімальної кількості баласту.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості впровадження його результатів на судна, що перевозять контейнери, для оптимізації планування їх рейсового завантаження, а також використання в практичній роботі агентських, суднохідних, крьюінгових та інших компаній.

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені в навчальний процес на кафедрі морських перевезень Національного Університету «Одеська Морська Академія» (акт від. 28.12.2020 р.), на кафедрі управління судном Херсонської Державної Морської Академії (акт від 30.12.2020 р.), в компанії «СМА SHIPS» для перепідготовки судноводіїв компанії (акт впровадження від 29.12.2020 р.), компанією «UNITEAM MARINE» для перепідготовки судноводіїв компанії (акт впровадження від 06.01. 2021 р.)

Особистий внесок здобувача. Дисертант самостійно виконав дисертаційну роботу: ним проаналізовані основні напрямки вирішення

проблеми забезпечення морехідної безпеки суден, проведено обґрунтування методологічного забезпечення дисертаційного дослідження, розроблено метод формування рейсового планування оптимального завантаження контейнеровозу, який урахує ротацію портів призначення, також запропоновано спосіб забезпечення доступності партій контейнерів при формуванні завантаження судна, здобувачем удосконалено спосіб визначення сил інерції качки в залежності від осьового моменту інерції судна та проведено впровадження результатів роботи в виробничий процес. В дисертаційній роботі з наукових праць, опублікованих автором у співавторстві, використані лише ті положення, які належать йому особисто: складання вантажного плану контейнеровозу з урахуванням ротації портів призначення [5].

Апробація результатів дисертації. Основні результати і положення роботи доповідалися і були схвалені на науково-практичних, науково-технічних і науково-методичних конференціях:

«Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» (Одеса, 14-15 листопада 2019 р.);

«Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2019)» (Херсон, 28 - 30 травня 2019 р.);

«Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» (Одеса, 12-13 листопада 2020 р.);

«Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2020)» (Херсон, 27 - 29 травня 2020 р.).

Публікації. За результатами виконаних досліджень автором опубліковано 9 наукових праць (з них 8 одноосібно), в тому числі: в наукових профільних виданнях, що входять до переліку МОН України – 3 наукові статті [1 - 3]; в зарубіжних наукових профільних виданнях – 2 наукові статті [4, 5]; в збірниках матеріалів наукових конференцій – 4 доповіді [6 - 9].

Структура роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних літературних джерел (139 найменувань) і додатків. Загальний обсяг роботи становить 183 сторінок та містить 44 рисунки, зокрема: 160 сторінки основного тексту, 17 сторінок списку використаних джерел, 6 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність теми дисертації, показано її зв'язок із програмами наукових досліджень університету, сформульовано мету дисертаційного дослідження і визначено його головну задачу, яка розділена на незалежні складові задачі, показано наукову новизну дисертаційного дослідження та його практичне значення.

У **першому розділі** здійснено аналіз основних аспектів вирішення проблеми забезпечення безаварійного плавання суден, виходячи з огляду літературних джерел.

Суттєвий внесок в теорію і практику вирішення проблеми забезпечення безаварійності судноводіння зробили вітчизняні та іноземні вчені Аксютін Л.Р., Воробйов Ю.Л., Вагущенко Л.Л., Кондрашихін В.Т., Мальцев А.С., Сизов В.Г., Цимбал М.М., Фрейдзон І.Р., Крилов А.В. та Lisowski J.

В результаті проведеного аналізу було встановлено, що центральним напрямом рішення згаданої проблеми є вдосконалення методів планування оптимального завантаження контейнеровозів.

Другий розділ містить обґрунтування теми дисертаційного дослідження та проведення його методологічного забезпечення.

Розроблено технологічну карту дисертаційного дослідження, в якій відображені мета, головна задача дисертаційного дослідження, його робоча гіпотеза та визначені об'єкт і предмет дослідження. Методами теорії дослідження операцій була проведена декомпозиція головної задачі дисертації на три складові незалежні задачі.

В **третьому розділі** представлені матеріали і методи, які необхідні для вирішення задач дисертаційного дослідження, а також розглянуто першу складову задачу, яка полягає в забезпеченні вимог морехідної безпеки судна під час розміщення партій контейнерів на судні.

В розділі показано, що при завантаженні контейнеровозу, з подальшим вивантаженням в декількох портах, розміщення вантажу в трюмах судна слід проводити з урахуванням послідовності портів вивантаження, забезпечуючи доступ до необхідних партій вантажу, а також з урахуванням того, що всі проміжні стани завантаження повинні задовольняти вимогам остійності, посадки та міцності судна, а сили інерції, що виникають під час хитамиці, повинні бути в допустимих межах. В зв'язку з цим було проведено формальний опис обмежень згідно з морським станом судна, в якому наведено основні відомості щодо формалізації обмежень відносно морського стану судна, що необхідні для вибору оптимальної стратегії завантаження судна.

Проведено формування задачі оптимізації завантаження контейнеровозу, в якій критерієм оптимальності вибрано кількість прийнятого баласту під час формування плану завантаження контейнерів з урахуванням вимог морехідної безпеки, який повинен бути мінімізований. Більш того, сили інерції, що виникають під час хитамиці і діючі на контейнери повинні знаходитись в допустимих межах, а, якщо можливо, мати мінімальні значення.

Так як в якості критерію оптимальності вибрано кількість прийнятого баласту під час завантаження контейнерів, тому критерій оптимальності $K = W_b$, а сама задача оптимізації формалізується наступним чином:

$$K = \sum_{i=1}^m W_{bi} \rightarrow \min$$

$$\left(\sum_{i=1}^n W_{ci} X_{gi} + \sum_{i=1}^m W_{bi} X_{bi} \right) \in [\Delta \bar{M}_{xc}^*, \Delta \bar{M}_{xc}^*];$$

$$\left(\sum_{i=1}^n W_{ci} Y_{gi} + \sum_{i=1}^m W_{bi} Y_{bi} \right) = 0;$$

$$\left(\sum_{i=1}^n W_{ci} Z_{gi} + \sum_{i=1}^m W_{bi} Z_{bi}\right) \in [\Delta\bar{M}_{zc}^*, \Delta\bar{M}_{zc}^*];$$

$$F_{\max} < F_d,$$

де n і m – відповідно число беїв і використаних баластних танків;
 W_{bi} , X_{bi} , Y_{bi} і Z_{bi} – відповідно вага баласту в i -му танку і координати його сили тяжіння;

W_{ci} , X_{gi} , Y_{gi} і Z_{gi} – відповідно вага i -го бею і координати сили тяжіння завантажених беїв;

$\Delta\bar{M}_{xc}^*$, $\Delta\bar{M}_{zc}^*$ та $\Delta\bar{M}_{xc}^*$, $\Delta\bar{M}_{zc}^*$ – значення нижніх та верхніх меж приросту відповідних статичних моментів;

F_{\max} та F_d – відповідно найбільша з сил інерції, що діє на кожен з контейнерів завантаження, і допустиме значення сили інерції.

В роботі розглянуто планування завантаження судна в одному порті партіями контейнерів, призначеними для декількох портів, і показано, що формування початкового завантаження G_0 необхідно починати з визначення допустимого останнього завантаження $G_{c(n-1)}$ перед здачею вантажу в останньому порті, а потім крок за кроком переміщуватися до попереднього завантаження, поки не буде отримане початкове завантаження в порті відправлення.

Спочатку розглянутий приклад формування завантаження партії вантажу $G_{c(n-1)}$ перед її здачею в останньому порті, вважаючи, що прийом контейнерів здійснюється в одне вантажне приміщення, причому вважається, що всі контейнери мають однакові розміри, а центр ваги контейнеру збігається з його геометричним центром.

Вантажне приміщення складається із потенційних контейнерних місць, причому положення центру кожного з яких у вантажному приміщенні задається відносно судової системи координат і характеризується координатами x_s , y_s і z_s , де s – індекс потенційного контейнерного місця в вантажному приміщенні. Маса кожного контейнеру позначено m_j , де j – індекс контейнеру в партії.

Завантаження передбачає розміщення контейнерів по потенційним контейнерним місцям вантажних приміщень, тобто мас m_j по координатам x_s , y_s , z_s , таким чином, щоб виконувалися вимоги по посадці, остійності і міцності судна.

Вантажне приміщення можна представити у вигляді тривимірної матриці, стовпці якої характеризують розташування потенційних контейнерних місць у вантажному приміщенні по довжині судна, рядки – по його ширині, а яруси – по висоті.

Припустимо, партія, що завантажується, розташовується в центральному трюмі судна, через який проходить мідель-шпангоут і для розглянутого випадку система координат трюму збігається з судовою системою координат.

Структура трюму характеризується впорядкованими потенційними контейнерними місцями в тривимірному просторі, причому розміри потенційного контейнерного місця рівні розмірам контейнера Δx , Δy і Δz , а число беїв рівне a , число ярусів c та кількість контейнерів в ярусі b . Формалізація структури трюму доцільна тривимірною матрицею, елементами якої є координати геометричного центру потенційного контейнерного місця x_i , y_j та z_k ($i=1..a, j=1..b, k=1..c$). Очевидно, з урахуванням розмірів контейнеру:

$$x_i = X_o + \frac{2i-1}{2}\Delta x, \quad y_j = Y_o + \frac{2j-1}{2}\Delta y, \quad z_k = Z_o + \frac{2k-1}{2}\Delta z,$$

де X_o , Y_o і Z_o – координати початку трюму, причому

$$X_o = -\frac{a}{2}\Delta x, \quad Y_o = -\frac{b}{2}\Delta y \quad \text{і} \quad Z_o = 0.$$

Множину контейнерів Mn_{Np} з масами m_{Nps} необхідно розподілити по потенційних контейнерних місцях, тобто завантаження доповнює кожен елемент матриці скалярною величиною, рівною вазі контейнеру. Тепер кожен елемент матриці характеризується координатами x_i , y_j , z_k та вагою gm_{ijk} . Дана обставина перетворює матрицю в тензор завантаження.

Збільшення статичних моментів ΔM_x , ΔM_y та ΔM_z , які виникають в результаті прийому вантажу, залежать від елементів тензору завантаження наступним чином:

$$\begin{aligned} \Delta M_x &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c gm_{ijk} \left(\frac{2i-1}{2} - \frac{a}{2} \right) \Delta x; \\ \Delta M_y &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c gm_{ijk} \left(\frac{2j-1}{2} - \frac{b}{2} \right) \Delta y; \\ \Delta M_z &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c gm_{ijk} \left(\frac{2k-1}{2} \right) \Delta z. \end{aligned}$$

Для забезпечення морехідної безпеки прирости статичних моментів ΔM_x , ΔM_y та ΔM_z повинні задовольняти наступним вимогам:

$$\Delta M_x = \Delta M_d; \quad \Delta M_y = 0; \quad \Delta M_z = \Delta M_h,$$

де ΔM_d та ΔM_h – моменти, які забезпечують необхідні значення диференту, остійності та загальної повздожньої міцності судна.

В приведених рівняннях вакантні маси m_{ijk} в тензорі завантаження необхідно замінити масами m_{Nps} контейнерів множини Mn_{Np} таким чином, щоб різниця між правою і лівою частинами кожного з рівнянь була мінімальна.

Першим етапом формування тензору завантаження є розподіл контейнерів по беям трюму, для чого сумарну вагу P_{Σ} контейнерів множини Mn_{Np} розділимо на число беїв і отримаємо середню вагу контейнерів бею $P_{cp} = P_{\Sigma} / a$. Для створення необхідного диференту, який забезпечується приростом моменту ΔM_d , необхідно змінити середню вагу бею P_{cp} на величину, кратну деякій вазі ΔP . Показано, що розподіл ваги P_{Σ} всіх контейнерів, що завантажуються, по беям має здійснюватися згідно залежностям:

$$P_i = P_{cp} + \left[\frac{a}{2} - (i-1)\right]\Delta P, \quad (i \leq a/2)$$

$$P_i = P_{cp} - \left[\frac{a}{2} - (i-1)\right]\Delta P, \quad (i > a/2)$$

$$\text{де } \Delta P = \frac{\Delta M_d}{2\Delta x \Phi(a)} \text{ і } \Phi(a) = \sum_{i=1}^{a/2} \left\{ \left[\frac{a}{2} - (i-1)\right] \left[\frac{a-1}{2} - (i-1)\right] \right\}.$$

Множину контейнерів Mn_{Np} з вагою P_{cj} необхідно розмістити по беям, враховуючи, що число контейнерів кожного бея однаково та дорівнює $n_a = bc$, а вага кожного бею була максимально близькою до отриманого значення P_i .

Для цього слід провести ранжування контейнерів в послідовності убавання їх ваги, тобто першим членом послідовності є контейнер з максимальною вагою P_{c1} , а останнім – контейнер з мінімальною вагою P_{cd} . Іншими словами, послідовність $P_{ci} \succ = \{P_{c1} \geq P_{c2} \geq \dots \geq P_{cd-1} \geq P_{cd}\}$ в подальшому розглядається як множина Mn_{Np} .

Формування першого бею з максимальною вагою P_1 проводиться за допомогою послідовності $P_{ci} \succ$. З неї необхідно виділити фрагмент з n_a послідовних контейнерів $\{P_{ci}\}_1 \succ$ сумарна вага яких \tilde{P}_1 мінімально відрізняється від розрахункового значення P_1 . Припустимо, що фрагмент послідовності $\{P_{ci}\}_1 \succ$ починається контейнером з порядковим номером N_{n1} послідовності $P_{ci} \succ$ і закінчується контейнером з її порядковим номером N_{k1} . Отже, перший бей становлять контейнери послідовності $P_{ci} \succ$ від N_{n1} -го до N_{k1} -го контейнерів включно, які складають фрагмент $\{P_{ci}\}_1 \succ$. Для цього фрагменту $P_1 - \tilde{P}_1 = \min$, а через S_{p1} позначимо підмножину контейнерів першого бею.

Для формування чергового другого бею слід використовувати послідовність, яка залишилась $P_{ci}^1 \succ = P_{ci} \succ - \{P_{ci}\}_1 \succ$, причому

$$P_{ci}^1 \succ = \{P_{c1} \geq P_{c2} \geq \dots \geq P_{cN_{n1}-1} \geq P_{cN_{n1}+1} \dots \geq P_{cd-1} \geq P_{cd}\}.$$

Надалі з отриманої послідовності $P_{ci}^1 \succ$ аналогічно попередньому виділяється фрагмент $\{P_{ci}^1\}_2 \succ$ з n_a послідовних контейнерів, сумарна вага \tilde{P}_2 яких мінімально відрізняється від розрахункового значення P_2 . Виділені контейнери складають підмножину Sr_2 другого бею.

Формування наступних беїв (підмножин Sr_i) проводиться аналогічно.

Остання модифікована послідовність $P_{ci}^{a-1} \succ$ що містить n_a останніх контейнерів, які і складають останній а-й бей, формуючи підмножину Sr_a , причому його вага \tilde{P}_a мінімально відрізняється від P_a .

Таким чином проводиться декомпозиція вихідної множини контейнерів Mn_{Np} по баям Sr_i у вигляді послідовностей $\{Pk_{ci}^{k-1}\}_k \succ$, при цьому забезпечується необхідний диферент судна.

Потім в кожному з беїв необхідно розподілити кількість $n_a = bc$ контейнерів по ярусах, в кожному з яких знаходиться b контейнерів. Розподіл контейнерів по ярусах в баях має забезпечити необхідний приріст моменту ΔM_h , який є сумою приростів ΔM_{hi} кожного бею, тобто $\Delta M_h = \sum_{i=1}^{ai} \Delta M_{hi}$. Для

створення максимального моменту інерції J_{xc} ближче до центру трюму слід розміщувати контейнери з меншими масами, а ближче до бортів – контейнери з більшою масою.

В останньому підрозділі приведено процедуру оцінки максимальної величини горизонтальної сили інерції, що діє на вантаж під час хитавиці судна.

Таким чином, у розділі представлені матеріали і методи, які необхідні для вирішення задач дисертаційного дослідження, а також забезпечення вимог морехідної безпеки судна під час розміщення партій контейнерів завантаження.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [1, 6, 8].

У четвертому розділі розроблено метод рейсового планування оптимального завантаження контейнеровозу з урахуванням ротації портів заходу та спосіб врахування доступності партій контейнерів під час формування завантаження судна, якому присвячена друга складова задача дисертаційного дослідження.

В розділі приведено формулювання завдання в загальному вигляді. Вважається, що під час рейсу судно заходить в N портів, в яких відбувається прийом або здача вантажу. У кожному порту завантаження вказуються партії прийнятих контейнерів із зазначенням порту вивантаження. До однієї партії відносяться всі контейнери, адресовані в один порт. Тому в кожному порті завантаження може бути тільки одна партія вантажу, адресована для вивантаження в конкретному подальшому порті.

В загальному випадку важливі два основних аспекти завантаження судна:

- формування тензору завантаження, що представляє розподіл мас партій контейнерів по вантажним приміщенням, а також баласту і запасів по танках, який задовольняє вимогам щодо морехідної безпеки і силам інерції хитавиці;

- розміщення вантажу в приміщеннях, що задовольняє умові доступності до вантажу для вивантаження, з умовою послідовності заходів у порти.

В частині формування тензору завантаження слід зазначити, що тензор завантаження крім партій вантажу повинен враховувати баласт P_{bs} та запаси P_{zs} , розміщені по танках. Тому спочатку формується укрупнений тензор розподілу вантажу по приміщеннях, а також баласту і запасів по танках.

Далі проводиться детальне формування окремих «теоретичних» тензорів завантаження по вантажним приміщенням, які представляють собою розподіл мас партій по баям і ярусам вантажного приміщення, з урахуванням значень приватних збільшень поздовжнього і вертикального статичних моментів. Черговий етап полягає в перетворенні «теоретичних» тензорів завантаження по вантажним приміщенням в реальні тензори, яке передбачає розташування конкретних контейнерів по баям (X) і ярусам (Z). Розміщення контейнерів в ярусах (Y) проводиться для формування моменту інерції судна відносно поздовжньої осі з метою мінімізації сил інерції.

Формування укрупненого тензору завантаження судна передбачає планування розміщення партій контейнерів з вантажних приміщень судна і запасів по танках, а також в разі необхідності – баласту по баластним танкам для всього рейсу судна з урахуванням передбачених прийому і здачі вантажу в портах. При формуванні укрупненого тензору завантаження судна потрібно виконання двох умов:

1. Розміщення партій контейнерів по вантажних приміщеннях судна, яке задовольняє умові доступності до партії для вивантаження, з умовою послідовності заходів у порти.

2. Завантаження судна перед черговим переходом між портами повинна задовольняти вимогам морехідної безпеки і силам інерції хитавиці.

Умова допустимості пов'язана з послідовністю розміщення партій контейнерів у вантажних приміщеннях. Слід зазначити, що доступність істотна, якщо в вантажному приміщенні знаходяться контейнери, які належать різним партіям.

В розділі показано, що вивантаження партії доступне в разі:

1. Коли у вантажному приміщенні знаходяться контейнери однієї партії, або партії вантажу завантажені в різних портах, але мають один і той же порт вивантаження.

2. Якщо у вантажному приміщенні знаходяться декілька партій, то в разі їх розташування один над одним у верхній партії порт вивантаження раніше, ніж у нижній партії (горизонтальна межа поділу).

3. Якщо у вантажному приміщенні розміщено кілька партій контейнерів, кожна з яких займає його частину і не перекривається зверху іншою партією (вертикальна межа поділу).

У разі, коли в трюмі знаходиться кілька партій, адресованих в різні порти вивантаження, то їх доступність можлива, якщо забезпечена доступність всіх суміжних пар партій, тобто мають вертикальну або горизонтальну межу поділу.

Знаючи послідовність завантаження і вивантаження партій в портах протягом рейсу, можна розміщувати партії при завантаженні таким чином, щоб своєчасним вивантаженням забезпечити при завантаженні партій в проміжних портах їх доступність в портах призначення.

В розділі розглянуто формування укрупненого тензору завантаження згідно вимог морехідної безпеки судна.

Наведено загальні закономірності при формуванні тензору завантаження декількох партій контейнерів, прийом і вивантаження яких можливий в різних портах, враховуючи, що планування завантажень проводиться від останнього порту до першого.

Якщо в першому порті завантажується партія вантажу для останнього порту P_1^N , то її розміщення Q_1^N є постійною складовою тензорів Q_i всіх завантажень судна G_i , тобто $Q_1^N \subset Q_i$.

Якщо N-1-й порт є портом 1-ї категорії, в якому проводиться тільки прийом множини партій \bar{P}_{N-1} , то попереднє завантаження G_{N-2} є частиною завантаження G_{N-1} , тобто $G_{N-2} \subset G_{N-1}$. Тому, тензор Q_{N-2} наслідує тензор Q_{N-1} .

В разі належності N-1-го порту до 2-ї категорії, коли проводиться тільки вивантаження множини партій контейнерів \tilde{P}_{N-1} , попереднє завантаження G_{N-2} є доповненням завантаження G_{N-1} , тобто $G_{N-1} \subset G_{N-2}$. Тому тензор Q_{N-2} доповнює тензор Q_{N-1} .

І, нарешті, коли N-1-й порт відноситься до 3-ї категорії, в якому проводиться вивантаження множини партій контейнерів \tilde{P}_{N-1} з наступним завантаженням множини партій \bar{P}_{N-1} , завантаження G_{N-2} можна отримати із завантаження G_{N-1} шляхом заміщення партій \tilde{P}_{N-1} партіями \bar{P}_{N-1} . Очевидно тензор Q_{N-2} пов'язаний із тензором Q_{N-1} операцією заміщення деяких компонентів.

Таким чином, для формування тензору завантаження судна використовуються наступні операції: визначення постійної складової, доповнення тензору, успадкування, коли один тензор включає в себе другий, і заміщення складових тензору.

Розподіл ваги партії P_i^k по вантажним приміщенням є формування її теоретичного тензора Q_i^k , за допомогою якого необхідно визначити реальний тензор, що включає конкретні групи контейнерів партії P_i^k , сумарна вага яких мінімально відрізняється від розрахованої величини P_j . Для цього слід застосувати перетворення теоретичного тензору в реальний тензор методом «переміщеного вікна». Ширина «вікна» дорівнює кількості n_{hk} контейнерів у

вантажному приміщенні. При початковому положенні в «вікно» потрапляють члени послідовності від першого до n_{hk} -го, підраховується сумарна вага всіх контейнерів «вікна» \hat{P}_k та визначається різниця $\Delta P_k = |\hat{P}_k - P_k|$. Потім положення «вікна» щодо початку послідовності P_{ci}^{k-1} змінюється на одну позицію і визначається різниця ΔP_k . «Переміщення вікна» по послідовності P_{ci}^{k-1} та визначення різниці ΔP_k проводиться до тих пір, поки в «вікно» не потрапить останній контейнер послідовності. У якості складу бую $\{w_{ci}^{k-1}\}_k$ приймається контейнери «вікна» з мінімальним значенням ΔP_k .

Таким чином, проводиться декомпозиція вихідної множини контейнерів Mn_{Np} по вантажним приміщенням Sp_j у вигляді послідовностей $\{w_{ci}^{k-1}\}_k$, при цьому забезпечується необхідний диферент судна.

Отже, в четвертому розділі дисертації розроблено спосіб врахування доступності партій контейнерів під час формування завантаження судна.

Матеріали розділу опубліковано у роботах [1, 3, 7].

У **п'ятому розділі** досліджено залежність сил інерції хитавиці від завантаження судна, що являється третьою складовою задачею дисертаційного дослідження, та приведено результати імітаційного моделювання.

В першому підрозділі показано, що модуль максимального значення сили інерції від бортової хитавиці $F_{\theta mx}$ визначається виразом:

$$F_{\theta mx} = \frac{A}{\{[B - \bar{J}_x \omega_k^2]^2 + \mu_x^2 \omega_k^2\}^{1/2}},$$

де $A = m_c R_h \omega_k^2 \chi_\theta B$, $B = Dh_o$; m_c – маса контейнеру; R_h – радіус-вектор положення контейнеру відносно поздовжньої осі, що проходить через центр ваги судна; ω_k – уявна частота хвилювання; D – водотоннажність судна; h_o – поперечна початкова метацентрична висота; χ_θ – редуційний коефіцієнт під час бортової хитавиці; \bar{J}_x і μ_x – момент інерції судна і коефіцієнт демпфірування щодо поздовжньої осі X-X.

В свою чергу, момент інерції \bar{J}_x є сумою моментів інерції судна з запасами \bar{J}_{xv} і від завантажених контейнерів \bar{J}_{xc} , тобто $\bar{J}_x = \bar{J}_{xv} + \bar{J}_{xc}$, причому момент інерції \bar{J}_{xc} може формуватися однією з чотирьох процедур розміщення контейнерів по ярусах вантажного приміщення і двох процедур розміщення контейнерів в ярусі. З останньої формули випливає, що при інших рівних умовах максимальне значення $F_{\theta mx}$ сили інерції досягає мінімуму при максимальному значенні $[B - \bar{J}_x \omega_k^2]^2$, тобто розміщення контейнерів у вантажному приміщенні повинно забезпечити екстремальне значення \bar{J}_x

відносно поздовжньої осі, що проходить через центр ваги судна, і залежне від положення вантажного приміщення щодо цієї осі.

Визначення допустимості виникаючої сили інерції полягає у виборі контейнеру з максимальним значенням $m_i R_{vi}$, для якого розраховується сила інерції F_{0mxi} , яка є найбільшою, і вона порівнюється з гранично-допустимим значенням сили інерції.

В розділі розглянуто імітаційне моделювання завантаження судна «Скай Джемені», яке може приймати контейнери у вісім трюмів та на їх кришки. Розміщення контейнерів може проводитися в 16 вантажних приміщень (1 ÷ 8 трюму і 9 ÷ 16 кришки трюмів). У кожному з вантажних приміщень можна розмістити 192 двадцяти футових контейнери (чотири бей по шість ярусів, кожен з яких містить вісім контейнерів). Судно характеризується максимальною середньої осадкою 13,0 м і максимальною водотоннажністю 68318 т.

Планується рейс судна з заходом в п'ять портів, причому в першому порті проводиться повне завантаження судна 3072 двадцяти футовими контейнерами, загальна вага яких становить 45000 т. Вантаж складається з трьох партій P_1^5 , P_1^4 і P_1^2 , адресованих відповідно в п'ятий, четвертий і другий порти. У другому порті вивантажується партія P_1^2 та судно з двома партіями P_1^5 , P_1^4 прямує в третій порт, де завантажується партія контейнерів P_3^4 . В четвертому порті виконується вивантаження партій P_1^4 і P_3^4 , та судно лише з однією партією P_1^5 виконує перехід в останній п'ятий порт.

Характеристики перевезених партій контейнерів приведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Характеристики партій контейнерів

Партія	P_1^5	P_1^4	P_1^2	P_3^4
№ контейн.	1920	600	552	288
Вага партії	28800	9000	7200	4050

Рейс характеризується чотирма завантаженнями судна перед виходом з кожного порту. Характеристика завантажень приведена в таблиці 2.

В результаті кожного завантаження партій контейнерів диферент судна d повинен знаходитись в межах від 0 до -2,0 м. З вказаного інтервалу вибирається диферент, якому відповідало би розміщення контейнерів, що задовольняє вимогам поздовжньої міцності.

Таблиця 2 – Характеристики завантажень судна

Завантаження	1	2	3	4
Партії	P_1^5, P_1^4, P_1^2	P_1^5, P_1^4	P_1^5, P_1^4, P_3^4	P_1^5
Н контейн.	3072	2520	2808	1920
Вага завант.	45000	37800	41850	28800

У таблиці 3 наведені результати розрахунків завантажень, в яких, виходячи з характеристик партій контейнерів і гідростатичних таблиць, отримані значення граничних значень статичних моментів $M_{Xc(0)}$, $M_{Xc(-2)}$ і M_{Zc^*} за раніше отриманими виразами. Розрахунок проводився за допомогою комп'ютерної програми імітаційного моделювання, яка містить інформацію про гідростатиці судна «Скай Джемені».

Таблиця 3 – Результати розрахунків завантажень

Завантаження	1	2	3	4
Вага	45000	37800	41850	28800
D	59360	52160	56210	43160
x_c	4,66	5,46	5,02	6,30
\bar{M}	740,7	705,0	726,5	665,9
$M_{Xc(0)}$	-5556	12886	-2620	32448
$M_{Xc(-2)}$	-8396	5066	-6920	28988
Z_m	12,80	12,93	12,83	13,53
M_{Zc^*}	628739	544440	590578	455316

У всіх чотирьох завантаженнях загальною є партія контейнерів P_1^5 , тому планування її розміщення по вантажних приміщеннях судна проводиться в першу чергу, потім під час першого завантаження розміщуються партії P_1^4 та P_1^2 .

Як показало проведене імітаційне моделювання, комп'ютерною програмою були сформовані завантаження судна, особливістю яких є їх допустимість за вимогами його посадки, остійності та загальної поздовжньої міцності. Мінімізація сил інерції під час хитавиці судна під час переходу досягнута порядком укладання контейнерів в кожному ярусі: контейнери з більшою масою розташовуються ближче до діаметральної площини судна.

В якості прикладу на рис/ 1 показано розміщення партій першого завантаження, де у верхній частині відображено розміщення контейнерів (вид збоку) на кришках трюмів і в трюмах, а нижче – розміщення контейнерів (вид зверху) в трюмах.

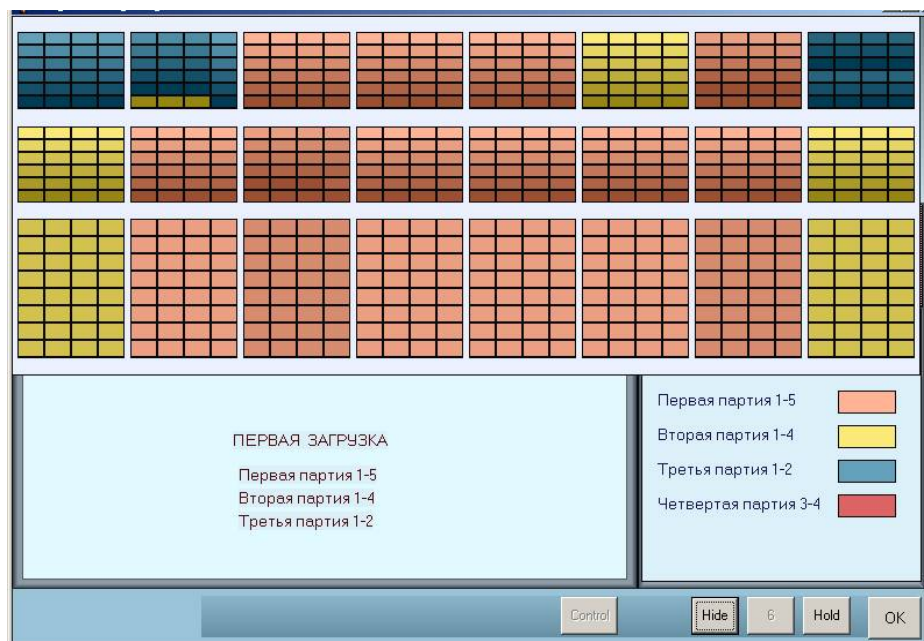


Рисунок 1 – Розміщення партій першого завантаження

У імітаційній програмі є модуль оцінки параметрів посадки, остійності та поздовжньої міцності судна «Скай Джемені», використовуючи його гідростатичні таблиці і інформацію про міцність. З огляду на розподіл ваги контейнерів партій завантаження, програмою розраховуються критерії морехідного стану судна, які відображаються у вигляді діаграми статичної остійності, епюр перерізуючих сил і згинальних моментів, як показано на рис. 2 для першого завантаження судна і мають допустимі значення.

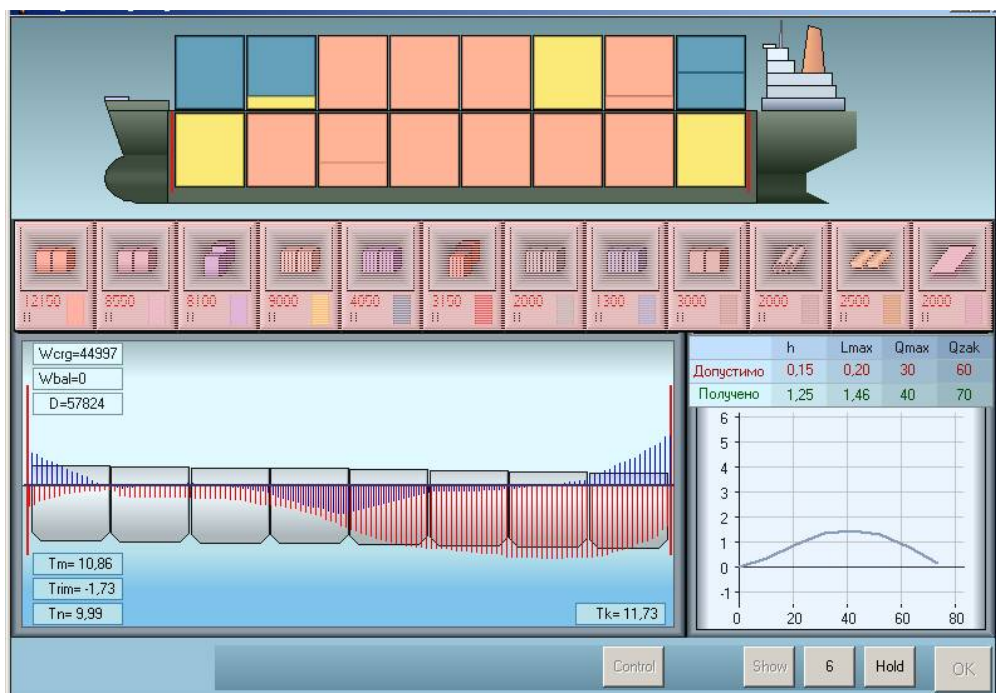


Рисунок 2 – Характеристики морехідного стану першого завантаження

Зведена інформація щодо морехідної безпеки всіх завантажень судна під час його рейсу приведена в таблиці 4, в якій вказані значення початкової

метацентричної висоти, критеріїв діаграми статичної остійності і параметрів посадки судна, а також їх допустимі значення.

Таблиця 4 – Параметри морехідної безпеки завантажень судна

Завантаження	1	2	3	4	Допуст.
Вага	45000	37800	41850	28800	
D	59360	52160	56210	43160	68318
h	1,25	2,82	2,01	7,37	0,15
L_{max}	1,46	2,22	1,85	4,58	0,20
θ_{max}	40	40	40	40	30
θ_{zak}	70	70	70	70	60
T_n	9,99	8,93	9,66	7,90	-
T_k	11,73	10,22	10,94	7,96	-
T_m	10,86	9,57	10,30	7,93	13,00
d	-1,73	-1,29	-0,12	-0,05	0 ÷ -2,00

ВИСНОВКИ

Підвищення безаварійності судноводіння являється однією із найважливіших проблем безпеки мореплавання, вирішення якої сприяє зниженню шкоди навколишньому середовищу та покращенню охорони людського життя на морі. Одним із суттєвих аспектів згаданої проблеми є забезпечення морехідної безпеки суден їх коректним завантаженням.

У дисертації одержано теоретичне узагальнення і нове вирішення задачі забезпечення безпеки судноводіння шляхом розробки нового методу формування рейсового планування оптимального завантаження контейнеровозу згідно ротації портів призначення, що має комп'ютерну реалізацію і відрізняється мінімізацією кількості прийому баласту та сил інерції хитавиці судна.

У дисертаційній роботі:

- вперше розроблений спосіб визначення контейнеру, на який діє максимальна сила інерції качки, в залежності від завантаження судна для оцінки морехідної безпеки судна;

- вперше запропоновано процедура забезпечення доступності партій контейнерів в порту їх призначення для формування рейсового вантажного плану судна;

- одержали подальший розвиток методи забезпечення вимог морехідної безпеки судна шляхом оптимального розміщення партій контейнерів завантаження для прийому мінімальної кількості баласту.

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені в навчальний процес на кафедрі морських перевезень Національного Університету «Одеська Морська Академія» (акт від. 28.12.2020 р.), на кафедрі управління судном Херсонської Державної Морської Академії (акт від

30.12.2020 р.), в компанії «СМА SHIPS» для перепідготовки судноводіїв компанії (акт впровадження від 29.12.2020 р.), компанією «UNITEAM MARINE» для перепідготовки судноводіїв компанії (акт впровадження від 06.01. 2021 р.)

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Цымбал М.Н. Формирование тензора загрузки контейнеровоза в случае проведения грузовых операций в нескольких портах. / Цымбал М.Н. // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, - 2019. - Вып. 29. – С. 35-41.
2. Цымбал М.Н. Расчет рейсового грузового плана контейнеровоза. / Цымбал М.Н. // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, - 2020. - Вып. 30. – С. 144 – 151.
3. Цимбал М.М. Формування плану завантаження контейнеровозу. / Цимбал М.М. // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2020. – № 1(22). – С. 64 – 73.
4. Цымбал М.Н. Планирование загрузки контейнеровоза в случае проведения грузовых операций в нескольких портах. / Цымбал М.Н. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VIII (27), Issue: 224, 2020. - С. 71 - 73.
5. Власенко Е.А. Имитационное моделирование загрузки контейнеровоза. / Власенко Е.А., Калиниченко Е.В., **Цымбал М.Н.** // Austria - science, Issue: 26, 2019.- С. 43 - 49.
6. Цымбал М.Н. Моделирование загрузки судов разных типов. / Цымбал М.Н. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2019): Матеріали XI Міжнародної наук.-практ. конф., 28 - 30 травня. 2019 – Херсон: ХДМА, 2019. – С. 203–207.
7. Цымбал М.Н. Условие доступности к партиям контейнеров для их выгрузки. / Цымбал М.Н. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2020): Матеріали XII Міжнародної наук.-практ. конф., 27 - 29 травня. 2020 – Херсон: ХДМА, 2020. – С. 87-90.
8. Цымбал М.Н. Тензор загрузки контейнеровоза при грузовых операциях в нескольких портах. / Цымбал М.Н. // Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автматизація: Матеріали наук. -техн. конф., 14-15 листоп. 2019 – Одеса: НУ «ОМА», 2019. – С. 85 – 86.
9. Цымбал М.Н. Планирование рейсовой загрузки контейнеровоза. / Цымбал М.Н. // Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автматизація: Матеріали наук. -техн. конф., 12-13 листоп. 2020 – Одеса: НУ «ОМА», 2020. – С. 146 – 149.

АНОТАЦІЯ

Цимбал М.М. Розробка методу рейсового планування оптимального завантаження контейнеровозу. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.13 – навігація та управління рухом. – Національний Університет «Одеська морська академія», Одеса, 2021.

В дисертаційному дослідженні наведено аналітичні вирази, що характеризують формалізацію обмежень згідно морського стану судна, які формалізують відповідності вимог відносно посадки, остійності та загальної поздовжньої міцності судна.

Отримано аналітичні вирази оцінки максимальної величини горизонтальної сили інерції, що діє на вантаж під час хитавиці судна. Досліджено вплив осьового моменту інерції судна щодо поздовжньої осі на величину сил інерції хитавиці.

Запропоновано спосіб формування задачі оптимізації завантаження контейнеровозу, в якості критерію оптимальності вибрано кількість прийнятого баласту.

Розглянуто питання урахування доступності партій контейнерів, які вивантажуються, під час формування укрупненого тензору завантаження судна. Отримано умови доступності партій, які вивантажуються, і запропоновані процедури реалізації цих умов.

Запропоновано метод формування теоретичного тензору завантаження судна і його перетворення в реальний тензор. Розроблено необхідні процедури, що визначають порядок розміщення контейнерів в беях і ярусах приміщень.

Представлено результати імітаційного моделювання завантаження судна «Скай Джемені», яке виконує рейс із заходом в п'ять портів і перевозить чотири партії вантажу. Для кожного із чотирьох завантажень судна показано розташування контейнерів по вантажним приміщенням і визначені параметри посадки, остійності і загальної подовжньої міцності.

Запропоновано процедуру відображення плану розташування контейнерів у вантажних приміщеннях судна з допомогою імітаційної програми, причому крім відображення контейнерів вибраного бею також виводиться інформація про їх порядкові номери.

Ключові слова: морехідна безпека суден, завантаження контейнеровозів, сили інерції хитавиці судна, імітаційне моделювання завантаження судна.

АННОТАЦИЯ

Цымбал М.Н. Разработка метода рейсового планирования оптимальной загрузки контейнеровоза. – Квалификационный научный труд на правах рукописи. Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.13 – навигация и управление движением. – Национальный Университет «Одесская морская академия», Одесса, 2021.

В диссертационном исследовании приведены аналитические выражения, которые формализуют соответствия требований по посадке, остойчивости и общей продольной прочности судна.

Получены аналитические выражения оценки максимальной величины горизонтальной силы инерции, которая действует на груз при качке судна. Исследовано влияние осевого момента инерции судна относительно продольной оси на величину сил инерции качки.

Предложен способ формирования задачи оптимизации загрузки контейнеровоза, причем в качестве критерия оптимальности выбрано количество принятого балласта, которое следует минимизировать.

Рассмотрен вопрос учета доступности партий контейнеров, которые выгружаются, при формировании укрупненного тензора загрузки судна. Получены условия доступности партий, которые выгружаются, и предложенные процедуры реализации этих условий.

Предложен метод формирования теоретического тензора загрузки судна и его преобразования в реальный тензор. Разработаны необходимые процедуры, которые определяют порядок размещения контейнеров в баях и ярусах помещений.

Представлены результаты имитационного моделирования загрузки судна «Скай Джемени», которое выполняет рейс с заходами в пять портов и перевозит четыре партии груза. Для каждой из четырех загрузок судна показано размещение контейнеров по грузовым помещениям и определены параметры посадки, остойчивости и общей продольной прочности.

Предложена процедура отображения плана расположения контейнеров в грузовых помещениях судна с помощью имитационной программы, причем кроме отображения контейнеров выбранного бая также выводится информация об их порядковых номерах.

Ключевые слова: мореходная безопасность судов, загрузки контейнеровозов, силы инерции качки судна, имитационное моделирование загрузки судна.

ANNOTATION

Tsybmal M.M. The development of the optimum container carrier loading method during the voyage planning. It is the qualifying scientific assignment on a manuscript right. Assignment for getting the scientific degree of engineering sciences candidate according to speciality 05.22.13 – Navigation and traffic control – National University «Odesa Maritime Academy», Odesa, 2021.

Analytical expressions, which characterize the formalization of limitations in obedience to the vessel's marine state, which formalize the accordance to requirements on landing, stability, and general longitudinal durability of the vessel, are resulted in the research assignment. The maximum values of suitable vessel's marine state static are acquired.

Analytical expressions of the horizontal inertial force maximum value estimation, which influence the cargo while tossing, are gained.

An axial moment influence of the vessel's inertia to a longitudinal axis on values of inertial tossing forces is explored. The dependency of inertial tossing forces from the vessel's inertial axial moment and the resulted computer procedure of the inertial forces' determination is obtained.

The method of the forming an optimized container carrier loading task is offered. The amount of the accepted ballast was chosen as the quality optimum criteria. Nautical safety limitations and influencing inertial tossing forces are formalized.

Resulted raising task of the development of the optimum container carrier loading method is provided in a general. The basic stages of scientific research are formulated.

The question of unloading container party's availability accountant, while forming the loading of the vessel with larger combined units to tensor, is considered. The terms of unloading container party's availability are acquired. Procedures of the above-mentioned terms realization are offered.

The method of the vessel's loading forming and its transformation from the theoretical to real tensor is offered. Necessary procedures which determine the order of the containers' placing on bays and tiers are evolved.

The imitation design results of the m/v «Sky Gemini» loading which executes a voyage with an entrance to five ports of call and transports four parties of loading are represented. For each four loadings the location of containers is shown on by the loading compartment and certain parameters of landing, stability, and general longitudinal durability.

Procedure of containers location plan reflection via the loading compartments of the ship with the help of the imitation program is offered. Thus, except from the chosen containers' reflection on the bay, the information about their sequence numbers also is shown.

Keywords: nautical safety of ships, loading of the container carrier, force of vessel's tossing inertia, imitation design of loading.

Підп. до друку 22.02.2021. Формат 60x84/16. Папір офсет.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 1,16.
Тираж 100 пр. Зам. № И21-02-36

Національний університет «Одеська морська академія»
65029, м. Одеса, Дідріхсона, 8.
Тел./факс (0482) 34-14-12
publish-r@onma.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 1292 від 20.03.2003