

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

Власенко Євген Анатолійович



УДК 628.12.001

**РОЗРОБКА МЕТОДУ ОПТИМАЛЬНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ
КОНТЕЙНЕРОВОЗУ З УРАХУВАННЯМ СИЛ ІНЕРЦІЇ ХИТАВИЦІ**

Спеціальність 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

Автореферат дисертації 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: доктор технічних наук, професор
Цимбал Микола Миколайович,
директор навчально-наукового інституту
навігації Національного університету
«Одеська морська академія», м. Одеса

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Вичужанін Володимир Вікторович,
завідувач кафедри інформаційних технологій
Державного університету «Одеська політехніка»

кандидат технічних наук, доцент
Демідюк Олександр Володимирович,
завідувач кафедри теорії і проектування корабля
імені професора Воробйова Ю.Л. Одеського
національного морського університету

Захист відбудеться 5 травня 2021 р. о 10:00 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 2 квітня 2021 р.

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



Нікольський В.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Зниження шкоди навколишньому середовищу та покращенню охорони людського життя на морі пов'язані із підвищенням безаварійності судноводіння, що являється однією з найважливіших проблем безпеки мореплавання, одним із суттєвих аспектів якої 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 відповідність з сучасними запитами торгового флоту. До таких питань відноситься забезпечення морехідного стану судна, яке у визначальній мірі залежить від коректності його завантаження.

При завантаженні контейнеровозу з подальшим розвантаженням в декількох портах вантаж слід розміщувати з урахуванням послідовності портів вивантаження, забезпечуючи вільний доступ до необхідних партій вантажу, а також враховувати, що проміжні стани завантаження повинні відповідати вимогам морехідної безпеки судна, а виникаючі сили інерції мають знаходитися в допустимих межах.

Тому 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 в рамках планів наукових досліджень національного університету «Одеська морська академія» за держбюджетною темою «Забезпечення безпеки судноводіння в стислих районах плавання» (№ ГР 0115U003580, 2018 р.), в якій здобувач виконав окремий підрозділ.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційного дослідження являється підвищення рівня морехідної безпеки суден шляхом вдосконалення методів визначення їх оптимального завантаження з урахуванням сил інерції хитавиці. Головна задача дослідження полягає в розробці алгоритмів визначення оптимального завантаження контейнеровозів.

Наукова гіпотеза дисертаційного дослідження полягає у допущенні про можливість формування оптимального завантаження контейнеровозів, яке забезпечує прийом мінімального баласту та найменш можливі сили інерції, що виникають при хитавиці судна.

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

1. Формування процедури розрахунку максимальних сил, діючих на вантаж в умовах хитання судна, та постановка задачі оптимізації завантаження.

2. Формалізація задачі оптимізації завантаження контейнеровоза, в якій критерієм оптимальності прийнято вагу баласту, а обмеженнями задачі оптимізації є вимоги по забезпеченню морехідної безпеки судна і виникаючим силам інерції при хитанні.

3. Розробка методу мінімізації сил інерції хитавиці за рахунок розташування контейнерів у вантажному приміщенні.

Об'єктом дослідження дисертації є процес завантаження судна за умовами морехідної безпеки.

Предметом дослідження являються методи оптимального завантаження суден.

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

- системного аналізу для визначення тематики дисертаційного дослідження та обґрунтування його методологічного забезпечення;
- дослідження операцій для розділення головної задачі дисертації на декілька складових задач;
- теоретичної механіки для формалізації хитання судна і виникаючих сил інерції;
- математичного аналізу для формування тензору завантаження контейнеровозів;
- математичного програмування для визначення оптимального завантаження судна контейнерами по відповідним критеріям.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в розробці нового методу визначення оптимального послідовного завантаження контейнеровозів згідно ротації портів призначення, що має комп'ютерну реалізацію і відрізняється застосуванням процедури формування тензору завантаження з урахуванням сил інерції, що виникають при хитавиці судна.

У дисертаційній роботі:

- вперше запропоновано метод синтезу теоретичного тензору завантаження судна і формування відповідного реального тензору завантаження для мінімізації сил інерції, що виникають при хитавиці судна;
- удосконалено математичну модель процесу завантаження контейнеровозу з урахуванням сил інерції хитавиці в залежності від осьового моменту інерції судна та виконанням вимог морехідної безпеки;
- удосконалено спосіб формування оптимального завантаження судна партіями контейнерів, який ураховує ротацію портів призначення, для забезпечення безаварійного перевезення вантажу.

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

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені компанією «Plaz LLC» для розробки судової технічної документації (акт впровадження №210215-01 від 22.12.2020 р.), приватним підприємством «Авангард Морські Технології і К» для розробки інформацій об остійності контейнеровозів для

створення оптимальних варіантів завантаження з метою забезпечення безпеки плавання (акт впровадження від 11.01. 2021 р.) та товариством з обмеженою відповідальністю «КБ «ШИПЯРД» при розробки інформацій об остійності контейнеровозів та суден з варіантами завантаження контейнерами (акт впровадження від 15.10. 2020 р.). Матеріали дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі при викладанні дисципліни «Сучасні засоби управління морехідними якостями судна» (акт від 15.02.2021 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 оптимального завантаження судна партіями контейнерів, який урахує ротацію портів призначення, також запропоновано метод синтезу теоретичного тензору завантаження судна контейнерами, здобувачем розроблено процедуру визначення сил інерції хитавиці в залежність 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 [3], вираз розрахунку максимального значення горизонтальної складової сил інерції [4], алгоритм імітаційного моделювання завантаження контейнеровозу [7], завантаження судна з урахуванням сил інерції хитавиці [8].

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

- науково-технічна конференція «Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» (Одеса, 16-17 листопада 2017 р.);

- X Міжнародна науково - практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2018)» (Херсон, 29-31 травня 2018 р.);

- науково-технічна конференція «Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» (Одеса, 15-16 листопада 2018 р.).

Публікації. За результатами виконаних досліджень автором опубліковано 10 наукових праць (з них 6 одноосібно), в тому числі: в наукових профільних виданнях, що входять до переліку МОН України - 2 наукові статі [2,3]; в зарубіжних наукових профільних виданнях - 4 наукові статті [4-7]; в збірниках матеріалів наукових конференцій - 4 доповіді [1,8-10].

Структура роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних літературних джерел (132 найменування) і додатків. Загальний обсяг роботи становить 304 сторінки та містить 125 рисунків, зокрема: 183 сторінки основного тексту, 15 сторінок списку використаних джерел, 106 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ дисертаційної роботи містить обґрунтування перспективності та актуальності теми дисертації, в ньому сформульовано мету дисертаційного дослідження і показано його зв'язок із програмами наукових досліджень університету. Також у вступі викладено головну задачу роботи та проведено її декомпозицію на незалежні складові задачі, обґрунтовано наукову новизну дослідження та його практичне значення і цінність.

Перший розділ присвячено аналізу основних напрямків вирішення проблеми забезпечення безаварійного плавання суден на базі здійсненого огляду літературних джерел, який показав, що значний розвиток теорії і практики забезпечення безаварійності судноводіння зробили Аксютін Л.Р., Воробйов Ю.Л., Вагущенко Л.Л., Кондрашихін В.Т., Мальцев А.С., Сизов В.Г., Цимбал М.М., Крилов А.В. та інші.

Проведеним аналізом було визначено, що одним із центральних напрямів рішення проблеми забезпечення морехідної безпеки є розвиток попереднього планування завантаження контейнеровозів.

В другому розділі обґрунтовано тему дисертаційної роботи та проведено її методологічне забезпечення для коректного дослідження по темі дисертації.

В розділі розроблено технологічну карту дисертаційного дослідження, що містить мету, головну задачу дисертаційної роботи, в якій також приведена робоча гіпотеза дослідження та визначено об'єкт і предмет роботи. Головна задача дисертації розділена на три складові незалежні задачі за допомогою методів теорії дослідження операцій.

В третьому розділі розглянуто першу складову задачу, яка полягає в формуванні процедури розрахунку максимальних сил, діючих на вантаж в умовах хитання судна.

Перевезення контейнерів вимагає проводити їх кріплення з урахуванням ваги і діючих сил інерції. Величина сил інерції визначається лінійними прискореннями вантажу, які залежать від закономірностей зміни лінійних переміщень вантажу разом з палубою судна щодо опорної системи координат.

Рівняння бортового, кильового і вертикального хитання для розрахунку сил інерції, які впливають на вантаж, можна розглядати незалежно. Із трьох вказаних типів хитання визначаючим є бортове хитання, яке створює домінуючі сили інерції, тому спочатку розглянуто рівняння бортового хитання, з якого одержано вираз для закону зміни кута крену θ .

Для опису процесу хитання судна скористаємося початковим диференціальним лінійним рівнянням, яке є сумою моментів, діючих на судно при бортовому хитанні, і описує кут крену θ судна:

$$(J_x + m_x)\ddot{\theta} + \mu_x \dot{\theta} + D\theta = \chi_\theta D h_o \sin \omega_k t,$$

де J_x - момент інерції судна щодо подовжньої осі X-X;

m_x - узагальнені приєднані маси води щодо тієї ж осі X-X;

μ_x - коефіцієнт демпфування щодо осі X-X;

D - водотоннажність судна (сила тяжіння);

h_o - поперечна початкова метacentрична висота;

χ_θ - редуційний коефіцієнт при бортовому хитанні;

ω_k - уявна частота хвилювання.

Позбавляємося від коефіцієнта при старшій похідній і одержимо:

$$\ddot{\theta} + 2h\dot{\theta} + \omega_o^2 \theta = \chi_\theta \omega_o^2 \sin \omega_k t,$$

де $h = \frac{\mu_x}{2(J_x + m_x)}$ - коефіцієнт загасання;

$\omega_o^2 = \frac{Dh_o}{(J_x + m_x)}$ - квадрат власної частоти судна при бортовому хитанні.

Одержане рівняння є лінійним неоднорідним диференціальним рівнянням з постійними коефіцієнтами, і його рішення складається з часткового рішення θ_r і рішення відповідного однорідного рівняння.

В роботі показано, що часткове рішення θ_r має наступний вигляд:

$$\theta_r = \theta_m \sin(\omega_k t - \psi),$$

де $\theta_m = \frac{\chi_\theta \omega_o^2}{[(\omega_o^2 - \omega_k^2)^2 + 4h^2 \omega_k^2]^{1/2}}$ - амплітудне значення кута крену,

$\psi = \arctg(\frac{2h\omega_k}{\omega_o^2 - \omega_k^2})$ - початкова фаза.

Рішення відповідного однорідного рівняння, як показано в роботі, аналітично виражається наступним чином:

$$\theta = \exp\{-ht\} [M_1 \sin(\omega_d t) + M_2 \cos(\omega_d t)],$$

де $\omega_d = \sqrt{\omega_o^2 - h^2}$ - частота затухаючих коливань судна;

M_1 і M_2 - постійні інтегрування, причому

$$M_1 = \frac{1}{\omega_d} \left\{ \dot{\theta}_o + \theta_m \left\{ h \left[1 + \frac{2h\omega_k}{[(\omega_o^2 - \omega_k^2)^2 + 4h^2 \omega_k^2]^{1/2}} \right] - \omega_k \frac{(\omega_o^2 - \omega_k^2)}{[(\omega_o^2 - \omega_k^2)^2 + 4h^2 \omega_k^2]^{1/2}} \right\} \right\},$$

$$M_2 = \theta_o + \theta_m \frac{2h\omega_k}{[(\omega_o^2 - \omega_k^2)^2 + 4h^2 \omega_k^2]^{1/2}}.$$

Аналіз загального рішення початкового диференціального рівняння бортового хитання показує, що на власні затухаючі коливання судна з частотою ω_d накладаються гармонійні вимушені коливання з частотою хитання ω_k . Оскільки амплітуда власних затухаючих коливань судна достатньо швидко зменшується до нуля, то рівняння бортового хитання, як стаціонарний процес,

що показано в дисертації, можна характеризувати тільки вимушеними коливаннями:

$$\theta = \frac{\chi_{\theta} \omega_o^2}{[(\omega_o^2 - \omega_k^2)^2 + 4h^2 \omega_k^2]^{1/2}} \sin[\omega_k t - \arctg(\frac{2h\omega_k}{\omega_o^2 - \omega_k^2})]. \quad (1)$$

У разі подовжнього хитання судно має вимушені коливання з частотою хитання, так само як і при поперечному. Ізольоване рівняння подовжнього хитання і його рішення по своїй структурі аналогічні поперечному хитанню, тобто містить власні затухаючі коливання судна і вимушені гармонійні коливання з частотою хитання. Тому вираз для поточного значення кута диференту β також описується вимушеними гармонійними коливаннями з частотою хитання ω_k :

$$\beta = \frac{\chi_{\beta} \omega_{o\beta}^2}{[(\omega_{o\beta}^2 - \omega_k^2)^2 + 4h_{\beta}^2 \omega_k^2]^{1/2}} \sin[\omega_k t - \arctg(\frac{2h_{\beta} \omega_k}{\omega_{o\beta}^2 - \omega_k^2})], \quad (2)$$

де χ_{β} - редуційний коефіцієнт при кильовому хитанні;

$\omega_{o\beta}$ - власна частота судна при кильовому хитанні;

h_{β} - коефіцієнт загасання при кильовому хитанні.

Вертикальне поступальне хитання викликане орбітальним рухом судна, який вважається круговим з радіусом, рівним половині висоти хвилі. Вертикальна поступальна хода ζ носить гармонійний характер з частотою хитання ω_k і описується виразом:

$$\zeta = \zeta_o \sin(\omega_k t), \quad (3)$$

де $\zeta_o = 0,5h_w$ - амплітудне значення вертикального переміщення, причому h_w - висота хвилі.

Одержані вирази (1), (2) і (3) дають змогу розрахувати кутові прискорення від кильового і бортового хитання, а також лінійні прискорення і сили інерції, що впливають на вантаж.

Для розрахунку сил, діючих на вантаж в умовах судна в хитаючи, цілком достатньо враховувати його бортове, кильове і вертикальне хитання. В цьому випадку на вантаж з масою M_c діють сили інерції F_{θ} , F_{β} і F_{ζ} відповідно від бортового, кильового і вертикального хитання судна та сила тяжіння P_c .

Сила інерції F_{ζ} від вертикального хитання складається з силою тяжіння і має ті ж направляючі косинуси. Сили інерції від бортового F_{θ} і кильового F_{β} хитання судна визначаються тангенціальними і нормальними прискореннями, причому нормальними прискореннями нехтують через їх малість, а

тангенціальні прискорення направлені перпендикулярно радіусу кривизни переміщення вантажу щодо осі хитання.

Проекції сил, діючих на вантаж, в судновій системі координат позначені F_{X1} , F_{Y1} і F_{Z1} , для яких в роботі одержані вирази:

$$F_{X1} = m_c \omega_k^2 [\Delta Z \beta_o \sin(\omega_k t - \psi_\beta) - (\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t) \cos \theta \sin \beta],$$

$$F_{Y1} = m_c \omega_k^2 [\Delta Z \theta_o \sin(\omega_k t - \psi) + (\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t) \sin \theta],$$

$$F_{Z1} = m_c \omega_k^2 [A \sin(\omega_k t - \psi_z) - (\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t) \cos \theta \cos \beta],$$

де $\beta = \beta_m \sin(\omega_k t - \psi_\beta)$, $\theta = \theta_m \sin(\omega_k t - \psi)$;

ΔZ - відстань між центрами тяжіння судна G і вантажу G_c по осі $Z1$ - $Z1$.

Для розрахунку кріплення контейнеру необхідно знайти максимальні значення приведених проекцій сил, з цією метою потрібно записати перші похідні по кожній силі, прирівняти їх до нуля і з одержаного рівняння знайти момент часу, який після підстановки в рівняння для сили дасть її максимальне значення.

В результаті згаданих операцій отримані вирази для розрахунку максимальних значень сил, що діють на контейнер, центр тяжіння якого відстоїть від центру тяжіння судна на величини ΔX , ΔY і ΔZ при хитанні із уявною частотою ω_k і мають наступний аналітичний вираз:

$$\max F_{X1} = m_c \omega_k^2 [\Delta Z \beta_m \sin(\omega_k t_x - \psi_\beta) - (\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t_x) \cos \theta(t_x) \sin \beta(t_x)],$$

$$\max F_{Y1} = m_c \omega_k^2 [\Delta Z \theta_m \sin(\omega_k t_y - \psi) + (\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t_y) \sin \theta(t_y)],$$

$$\max F_{Z1} = m_c \omega_k^2 [A \sin(\omega_k t_z - \psi_z) - (\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t_z) \cos \theta(t_z) \cos \beta(t_z)],$$

в яких моменти часу t_x , t_y і t_z для кожної з сил розраховуються за допомогою виразів:

$$t_x = \frac{1}{\omega_k} \left\{ \psi_\beta + \arccos \left\{ \frac{1}{\Delta Z \beta_m} \left\{ 0,5h_w \cos \omega_k t_x \cos \theta \sin \beta + \left(\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t_x \right) \times \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \times [\beta_m \cos \theta \cos \beta \cos(\omega_k t_x - \psi_\beta) - \theta_m \sin \beta \sin \theta \cos(\omega_k t_x - \psi)] \right\} \right\} \right\},$$

де $\beta = \beta_m \sin(\omega_k t_x - \psi_\beta)$, $\theta = \theta_m \sin(\omega_k t_x - \psi)$;

$$t_y = \frac{1}{\omega_k} \left\{ \psi - \arccos \left\{ \frac{1}{\Delta Z \theta_m} [0,5h_w \cos \omega_k t_y \sin \theta + \right. \right.$$

$$+ \left(\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t_y \right) \theta_m \cos(\omega_k t_y - \psi) \cos \theta \} \},$$

де $\theta = \theta_m \sin(\omega_k t_y - \psi)$;

$$t_z = \frac{1}{\omega_k} \{ \psi_z + \arccos \{ \frac{1}{A} \{ 0,5h_w \cos \omega_k t_z \cos \theta \cos \beta -$$

$$\left(\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t_z \right) [\beta_m \cos(\omega_k t_z - \psi_\beta) \cos \theta \sin \beta +$$

$$+ \theta_m \cos(\omega_k t_z - \psi) \cos \beta \sin \theta] \} \} \},$$

де $\beta = \beta_m \sin(\omega_k t_z - \psi_\beta)$, $\theta = \theta_m \sin(\omega_k t_z - \psi)$.

Розрахунок моментів часу t_x , t_y і t_z проводиться методом простих ітерацій, який припускає наявність початкових наближень t_{x0} , t_{y0} і t_{z0} .

На закінчення розділу розглянуто випадок максимального значення суми горизонтальних проекцій F_{X1} і F_{Y1} , яку позначено F_{H1} . Показано, що максимальне значення горизонтальної складової $\max F_{H1}$ визначається виразом:

$$\max F_{H1} = m_c \omega_k^2 \{ [\Delta Z \beta_m \sin(\omega_k t_H - \psi_\beta) - \left(\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t_H \right) \cos \theta \sin \beta]^2 +$$

$$[\Delta Z \theta_m \sin(\omega_k t_H - \psi) + \left(\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t_H \right) \sin \theta]^2 \}^{1/2},$$

причому

$$t_H = \frac{1}{\omega_k} \{ \psi_\beta + \arcsin \{ \frac{1}{\Delta Z \beta_m} \{ \left(\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t_H \right) \cos \theta \sin \beta -$$

$$- \{ \Delta Z \beta_m \cos(\omega_k t_H - \psi_\beta) - 0,5h_w \cos \omega_k t_H \cos \theta \sin \beta -$$

$$- \left(\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t_H \right) [\beta_m \cos \theta \cos \beta \cos(\omega_k t_H - \psi_\beta) - \theta_m \sin \beta \sin \theta \cos(\omega_k t_H - \psi)] \}^{-1}$$

$$\times [\Delta Z \theta_m \sin(\omega_k t_H - \psi) + \left(\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t_H \right) \sin \theta] \times$$

$$[\Delta Z \theta_m \cos(\omega_k t_H - \psi) + 0,5h_w \cos \omega_k t_H \sin \theta +$$

$$+ \left(\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t_H \right) \theta_m \cos(\omega_k t_H - \psi) \cos \theta] \} \} \}.$$

Таким чином, у розділі сформована процедура розрахунку максимальних сил, діючих на вантаж в умовах хитання судна. Матеріали розділу опубліковано в роботах [1, 2, 8, 9].

У четвертому розділі проведено формалізацію задачі оптимізації завантаження контейнеровоза, в якій критерієм оптимальності прийнято вагу баласту, а обмеженнями задачі оптимізації є вимоги по забезпеченню морехідної безпеки судна і виникаючим силам інерції при хитанні, чому присвячена друга складова задача дисертаційного дослідження.

Під стратегією завантаження судна розуміється розміщення партій вантажу, що приймається, по вантажних приміщеннях судна і запасів та баласту по танках.

В роботі показано, що спочатку доцільно провести розрахунок граничних значень статичних моментів M_x^* , M_y^* і M_z^* , задовольняючих вимогам обмежень по морехідному стану судна. Після чого формується множина допустимих стратегій завантаження, при яких статичні моменти судна M_x , M_y і M_z не перевершують одержаних граничних величин статичних моментів M_x^* , M_y^* і M_z^* . При цьому необхідно, щоб водотоннажність судна знаходилася в допустимих межах і об'єм вантажу не перевершував вантажомісткість судна.

Граничні значення статичного моменту M_x^* визначаються допустимими межами диференту d і вимогами по загальній подовжній міцності судна.

Оскільки граничними величинами диференту є 0 і максимальне граничнодопустиме значення d_d , то для нижньої межі $M_{x(d)^*}$ і верхньої межі

$M_{x(d)}^*$ статичного моменту M_x в роботі одержані вирази:

$$M_{x(d)^*} = Dx_c \text{ і } M_{x(d)}^* = Dx_c + \bar{M}d_d,$$

де $\bar{M}$ - момент, що диферентує судно на один сантиметр;

x_c - абсциса центру величини, яка відповідна водотоннажності D .

Граничне значення статичного моменту M_x^* також визначається вимогами по загальній подовжній міцності судна. В роботі розроблено процедуру сумісний урахування обмежень величини моменту M_x^* по посадці судна і його подовжньої міцності. Спочатку загальна вага всього вантажу, що приймається, розташовується по баям так, щоб з урахуванням ваги порожнього судна і прийнятих запасів, виникаючий статичний момент $\bar{M}_x$, задовольняв вимогам по посадці судна, тобто $\bar{M}_x \in [M_{x(d)^*}, M_{x(d)}^*]$. При цьому перевіряються вимоги до його подовжньої міцності. Якщо вимоги до його подовжньої міцності задовольняються то стратегією завантаження є допустимою, інакше слід провести інше розміщення вантажу по баям з допустимим диферентом і знову перевірити подовжню міцність судна. Таким чином процедура повторюється до одержання допустимої стратегії завантаження.

Величина статичного моменту M_z впливає на остійність судна. Тому його допустимі граничні значення визначаються обмеженнями по остійності. Обмеження, в першу чергу, накладаються на початкову метацентричну висоту h , тобто $h_{dmin} \leq h \leq h_{dmax}$, де h_{dmin} і h_{dmax} - відповідно нижня і верхня межі початкової метацентричної висоти h , причому величина h_{dmin} визначається вимогами ІМО, а значення h_{dmax} - величиною критерію прискорення.

Верхня межа M_{Zh}^* моменту M_z по метацентричній висоті визначається виразом:

$$M_{Zh}^* = D(z_m + \Delta h - h_{dmin}),$$

де z_m - апліката метацентру, залежна від водотоннажності D ;

Δh - поправка метацентричної висоти на вільні поверхні.

Аналогічно розраховується нижня межа M_{Zh}^* , відповідна максимальному значенню h_{dmax} початкової метацентричної висоти:

$$M_{Zh}^* = D(z_m + \Delta h - h_{dmax}).$$

Критерії остійності $M_{опр}$, l_{max} , θ_{max} і $\theta_{зак}$ знаходяться за допомогою діаграм статичної остійності і обмежують статичний моменту M_z по вказаних змінних. Тому, якщо позначити загальні верхню M_z^* і нижню M_{z*} межі моменту, то справедливі наступні співвідношення:

$$M_{z*} = M_{Zh}^* ;$$

$$M_z^* = \min(M_{Zh}^*, M_{zоп}^*, M_{zm\theta}^*, M_{zl}^*, M_{z3\theta}^*), \quad D \in [D_*, D^*].$$

У роботі розроблено процедури розміщення контейнерів партії по беям вантажного приміщення, по ярусам беїв і в кожному ярусі, які забезпечують вимоги по посадці судна, його загальній подовжньої міцності та остійності, а також відсутність крену судна.

Для перевірки коректності запропонованих процедур формування завантаження вантажного приміщення без прийому баласту, була розроблена комп'ютерна програма, що дозволяє формувати початкову множину контейнерів Mn_{Np} і їх розміщення у вантажному приміщенні. Як приклад, було згенеровано множину контейнерів чисельністю 300 штук, загальною вагою 3000 тонн, причому вага контейнера знаходиться в межах від 3,4 до 16,5 т.

Вантажне приміщення характеризується $a=6$ беями, в кожному беї число ярусів дорівнює $c=5$, а число контейнерів в ярусі $b=10$.

Необхідні прирости статичних моментів, прийняті в прикладі, складають $\Delta M_d = -5000$ тм, $\Delta M_h = 22000$ тм.

Програмою проводиться ранжирування множини контейнерів Mn_{Nr} по вазі і його результати представлені на рис. 1. Для кожного з 300 контейнерів у верхній частині вказаний його номер в початковій множині, а в нижній частині - вага контейнеру. Як показано на рис. 1, контейнери ранжовані по зниженню ваги від 16,6 т до 3,37 т.

299	297	295	293	291	289	287	285	283	281	279	277	275	273	271	269	267	265	263	261	259	257	255	253	
16,6	16,5	16,5	16,4	16,4	16,4	16,3	16,3	16,2	16,2	16,1	16,1	16,0	16,0	16,0	15,9	15,9	15,8	15,8	15,7	15,7	15,6	15,6	15,6	
251	249	247	245	243	241	239	237	235	233	231	229	227	225	223	221	219	217	215	213	211	209	207	205	
15,5	15,5	15,4	15,4	15,3	15,3	15,2	15,2	15,2	15,1	15,1	15,0	15,0	14,9	14,9	14,9	14,8	14,8	14,7	14,7	14,6	14,6	14,5	14,5	
203	201	199	197	195	193	191	189	187	185	183	181	179	177	175	173	171	169	167	165	163	161	159	157	
14,5	14,4	14,4	14,3	14,3	14,2	14,2	14,1	14,1	14,1	14,0	14,0	13,9	13,9	13,8	13,8	13,7	13,7	13,7	13,6	13,6	13,5	13,5	13,4	
155	153	151	149	147	145	143	141	139	137	135	133	131	129	127	125	123	121	119	117	115	113	111	109	
13,4	13,3	13,3	13,3	13,2	13,2	13,1	13,1	13,0	13,0	13,0	12,9	12,9	12,8	12,8	12,7	12,7	12,6	12,6	12,6	12,5	12,5	12,4	12,4	
107	105	103	101	99	97	95	93	91	89	87	85	83	81	79	77	75	73	71	69	67	65	63	61	
12,3	12,3	12,2	12,2	12,2	12,1	12,1	12,0	12,0	11,9	11,9	11,8	11,8	11,8	11,7	11,7	11,6	11,6	11,5	11,5	11,5	11,4	11,4	11,3	
59	57	55	53	51	49	47	45	43	41	39	37	35	33	31	29	27	25	23	21	19	17	15	13	
11,3	11,2	11,2	11,1	11,1	11,1	11,0	11,0	10,9	10,9	10,8	10,8	10,7	10,7	10,7	10,6	10,6	10,5	10,5	10,4	10,4	10,3	10,3	10,3	
11	9	7	5	3	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	
10,2	10,2	10,1	10,1	10,0	10,0	9,95	9,91	9,86	9,82	9,77	9,73	9,69	9,64	9,60	9,55	9,51	9,47	9,42	9,38	9,33	9,29	9,24	9,20	
38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80	82	84	
9,16	9,11	9,07	9,02	8,98	8,94	8,89	8,85	8,80	8,76	8,71	8,67	8,63	8,58	8,54	8,49	8,45	8,41	8,36	8,32	8,27	8,23	8,18	8,14	
86	88	90	92	94	96	98	100	102	104	106	108	110	112	114	116	118	120	122	124	126	128	130	132	
8,10	8,05	8,01	7,96	7,92	7,88	7,83	7,79	7,74	7,70	7,66	7,61	7,57	7,52	7,48	7,43	7,39	7,35	7,30	7,26	7,21	7,17	7,13	7,08	
134	136	138	140	142	144	146	148	150	152	154	156	158	160	162	164	166	168	170	172	174	176	178	180	
7,04	6,99	6,95	6,90	6,86	6,82	6,77	6,73	6,68	6,64	6,60	6,55	6,51	6,46	6,42	6,37	6,33	6,29	6,24	6,20	6,15	6,11	6,07	6,02	
182	184	186	188	190	192	194	196	198	200	202	204	206	208	210	212	214	216	218	220	222	224	226	228	
5,98	5,93	5,89	5,84	5,80	5,76	5,71	5,67	5,62	5,58	5,54	5,49	5,45	5,40	5,36	5,32	5,27	5,23	5,18	5,14	5,09	5,05	5,01	4,96	
230	232	234	236	238	240	242	244	246	248	250	252	254	256	258	260	262	264	266	268	270	272	274	276	
4,92	4,87	4,83	4,79	4,74	4,70	4,65	4,61	4,56	4,52	4,48	4,43	4,39	4,34	4,30	4,26	4,21	4,17	4,12	4,08	4,03	3,99	3,95	3,90	
278	280	282	284	286	288	290	292	294	296	298	300													
3,86	3,81	3,77	3,73	3,68	3,64	3,59	3,55	3,50	3,46	3,42	3,37													
												0-5		5-10			10-15			15-20			20-30	
Элемен. тензор		0		Ранжирование			Структура			Укладка			Hold			Deck			OK					

Рис. 1. Ранжування множини контейнерів Mn_{Nr} по вазі

При використанні клавіші "Структура" програма проводить розподіл контейнерів по б'єм вантажного приміщення, причому кожен б'єй формується 50 контейнерами, як показано на рис. 2.

Для кожного б'єю програмою були розраховані необхідні (теоретичні) P_i і реальні $\tilde{P}_i$ значення ваги, заздалегідь розрахувавши різницю ваги між сусідніми б'єями $\Delta P = -32,47$ т. У нижче показаній табл. 1 приведені значення P_i і $\tilde{P}_i$ для кожного з б'єїв вантажного приміщення, причому різниця між P_i і $\tilde{P}_i$ є мінімальною.

Необхідні P_i і реальні $\tilde{P}_i$ значення ваги бейв

Бейт	P_i	$\tilde{P}_i$
1	597,4	598,2
2	564,9	566,8
3	532,5	535,0
4	467,5	468,6
5	435,0	431,1
6	402,6	400,2

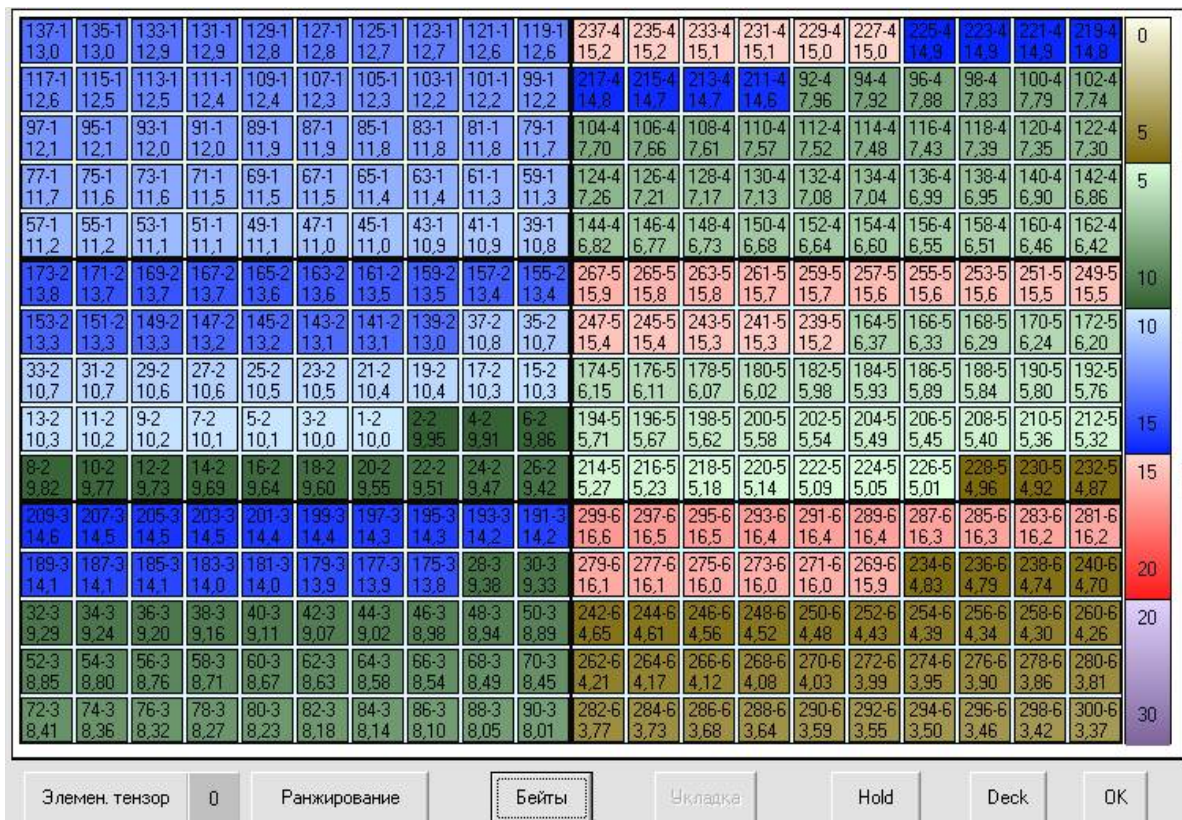


Рис. 2. Формування бейв

При використанні клавіші "Бей" програмою проводиться розподіл контейнерів кожного з бейв по ярусах. Програмою розраховується необхідна (теоретична) вага контейнерів k -го ярусу $\bar{P}_{y_k}^i$ за допомогою першої процедури (коли вага ярусу зменшується по мірі зростання висоти розташування ярусу). Потім проводиться формування реального ярусу з вагою $\hat{P}_{y_k}^i$. На рис. 3 приведені розташування ярусів в кожному із бейв вантажного приміщення. На рисунку перший бей показаний у верхній лівій частині. Звертаємо увагу на те, що в кожному з бейв нижній (перший) ярус, судячи з ваги контейнерів, які його складають, є найважчим, а верхній (п'ятий) ярус - найлегшим.

Розподіл контейнерів в ярусі з метою створення мінімального близького до нуля моменту M_y проводиться при використанні клавіші "Яруси", при цьому

задіяна процедура формування мінімального моменту інерції вантажу, що приймається, щодо подовжньої осі судна, що виходить з рис. 4.

444	83-1	124-1	125-1	126-1	127-1	128-1	129-1	130-1	131-1	32-4	33-4	224-4	225-4	226-4	227-4	228-4	229-4	230-4	231-4	0
464	13.0	11.1	11.1	11.1	11.0	11.0	10.9	10.9	10.8	15.2	15.2	6.73	6.68	6.64	6.60	6.55	6.51	6.46	6.42	
12.9	115-1	116-1	117-1	118-1	119-1	120-1	121-1	122-1	123-1	34-4	35-4	36-4	217-4	218-4	219-4	220-4	221-4	222-4	223-4	
12.9	11.5	11.5	11.5	11.4	11.4	11.3	11.3	11.2	11.2	15.1	15.1	15.0	7.04	6.99	6.95	6.90	6.86	6.82	6.77	
85-1	106-1	107-1	108-1	109-1	110-1	111-1	112-1	113-1	114-1	37-4	38-4	39-4	210-4	211-4	212-4	213-4	214-4	215-4	216-4	5
12.9	11.9	11.9	11.8	11.8	11.8	11.7	11.7	11.6	11.6	15.0	14.9	14.9	7.35	7.30	7.26	7.21	7.17	7.13	7.08	
86-1	97-1	98-1	99-1	100-1	101-1	102-1	103-1	104-1	105-1	40-4	41-4	42-4	203-4	204-4	205-4	206-4	207-4	208-4	209-4	5
12.8	12.3	12.3	12.2	12.2	12.1	12.1	12.0	12.0	12.0	14.9	14.8	14.8	7.66	7.61	7.57	7.52	7.48	7.43	7.39	
87-1	88-1	89-1	90-1	91-1	92-1	93-1	94-1	95-1	96-1	43-4	44-4	45-4	196-4	197-4	198-4	199-4	200-4	201-4	202-4	
12.8	12.7	12.7	12.6	12.6	12.6	12.5	12.5	12.4	12.4	14.7	14.7	14.6	7.96	7.92	7.88	7.83	7.79	7.74	7.70	
64-2	65-2	66-2	157-2	158-2	159-2	160-2	161-2	162-2	163-2	17-5	18-5	19-5	260-5	261-5	262-5	263-5	264-5	265-5	266-5	10
13.8	13.7	13.7	9.69	9.64	9.60	9.55	9.51	9.47	9.42	15.9	15.8	15.8	5.14	5.09	5.05	5.01	4.96	4.92	4.87	
67-2	68-2	69-2	150-2	151-2	152-2	153-2	154-2	155-2	156-2	20-5	21-5	22-5	253-5	254-5	255-5	256-5	257-5	258-5	259-5	10
13.7	13.6	13.6	10.0	9.95	9.91	9.86	9.82	9.77	9.73	15.7	15.7	15.6	5.45	5.40	5.36	5.32	5.27	5.23	5.18	
70-2	71-2	72-2	143-2	144-2	145-2	146-2	147-2	148-2	149-2	23-5	24-5	25-5	246-5	247-5	248-5	249-5	250-5	251-5	252-5	
13.4	13.5	13.4	10.3	10.3	10.2	10.2	10.1	10.1	10.0	15.6	15.6	15.5	5.76	5.71	5.67	5.62	5.58	5.54	5.49	
73-2	74-2	75-2	76-2	137-2	138-2	139-2	140-2	141-2	142-2	26-5	27-5	28-5	239-5	240-5	241-5	242-5	243-5	244-5	245-5	15
13.4	13.3	13.3	13.3	10.6	10.5	10.5	10.4	10.4	10.3	15.5	15.4	15.4	6.07	6.02	5.98	5.93	5.89	5.84	5.80	
77-2	78-2	79-2	80-2	81-2	132-2	133-2	134-2	135-2	136-2	29-5	30-5	31-5	232-5	233-5	234-5	235-5	236-5	237-5	238-5	15
13.2	13.2	13.1	13.1	13.0	10.8	10.7	10.7	10.6	10.6	15.3	15.3	15.2	6.37	6.33	6.29	6.24	6.20	6.15	6.11	
46-3	47-3	48-3	190-3	191-3	192-3	193-3	194-3	195-3	1-6	2-6	3-6	4-6	295-6	296-6	297-6	298-6	299-6	300-6		
14.6	14.5	14.5	8.23	8.18	8.14	8.10	8.05	8.01	16.6	16.6	16.5	16.4	3.59	3.55	3.50	3.46	3.42	3.37		
50-3	51-3	52-3	183-3	184-3	185-3	186-3	187-3	188-3	189-3	5-6	6-6	7-6	288-6	289-6	290-6	291-6	292-6	293-6	294-6	20
14.4	14.4	14.3	8.54	8.49	8.45	8.41	8.36	8.32	8.27	16.4	16.4	16.3	3.90	3.86	3.81	3.77	3.73	3.68	3.64	
53-3	54-3	55-3	176-3	177-3	178-3	179-3	180-3	181-3	182-3	8-6	9-6	10-6	281-6	282-6	283-6	284-6	285-6	286-6	287-6	20
14.3	14.2	14.2	8.85	8.80	8.76	8.71	8.67	8.63	8.58	16.3	16.2	16.2	4.21	4.17	4.12	4.08	4.03	3.99	3.95	
56-3	57-3	58-3	59-3	170-3	171-3	172-3	173-3	174-3	175-3	11-6	12-6	13-6	274-6	275-6	276-6	277-6	278-6	279-6	280-6	
14.1	14.1	14.1	14.0	9.11	9.07	9.02	8.98	8.94	8.89	16.1	16.1	16.0	4.52	4.48	4.43	4.39	4.34	4.30	4.26	
60-3	61-3	62-3	63-3	164-3	165-3	166-3	167-3	168-3	169-3	14-6	15-6	16-6	267-6	268-6	269-6	270-6	271-6	272-6	273-6	30
14.0	13.9	13.9	13.8	9.38	9.33	9.29	9.24	9.20	9.16	16.0	16.0	15.9	4.83	4.79	4.74	4.70	4.65	4.61	4.56	

Елемен. тензор

0

Ранжирование

Ярусы

Укладка

Hold

Deck

OK

Рис. 3. Формування ярусів

130-1 10.9	128-1 11.0	126-1 11.1	124-1 11.1	82-1 13.0	83-1 13.0	125-1 11.1	127-1 11.0	129-1 10.9	131-1 10.8	231-1 6.42	229-1 6.51	227-1 6.60	225-1 6.68	33-1 15.2	32-1 15.2	224-1 6.73	226-1 6.64	228-1 6.55	230-1 6.46	0
123-1 11.2	121-1 11.3	119-1 11.4	117-1 11.5	115-1 11.5	84-1 12.9	116-1 11.5	118-1 11.4	120-1 11.3	122-1 11.2	222-1 6.82	220-1 6.90	218-1 6.99	36-1 15.0	34-1 15.1	35-1 15.1	217-1 7.04	219-1 6.95	221-1 6.86	223-1 6.77	5
113-1 11.6	111-1 11.7	109-1 11.8	107-1 11.9	85-1 12.9	106-1 11.9	108-1 11.8	110-1 11.8	112-1 11.7	114-1 11.6	216-1 7.08	214-1 7.17	212-1 7.26	210-1 7.35	37-1 14.9	37-1 15.0	211-1 14.9	213-1 7.30	215-1 7.21	215-1 7.13	5
105-1 12.0	103-1 12.1	101-1 12.2	99-1 12.2	97-1 12.3	86-1 12.8	98-1 12.8	100-1 12.2	102-1 12.1	104-1 12.0	208-1 7.43	206-1 7.52	204-1 7.61	42-1 14.8	40-1 14.9	41-1 14.8	203-1 7.66	205-1 7.57	207-1 7.48	209-1 7.39	5
95-1 12.4	94-1 12.5	91-1 12.6	90-1 12.6	87-1 12.8	88-1 12.7	89-1 12.7	92-1 12.6	93-1 12.5	96-1 12.4	202-1 7.70	200-1 7.79	198-1 7.88	196-1 7.96	44-1 14.7	43-1 14.7	197-1 14.6	199-1 7.92	201-1 7.83	201-1 7.74	10
163-1 9.42	161-1 9.51	159-1 9.60	157-1 9.69	65-1 13.7	64-1 13.8	66-1 13.7	158-1 9.64	160-1 9.55	162-1 9.47	266-1 4.87	264-1 4.96	262-1 5.05	260-1 5.14	18-1 15.8	17-1 15.9	19-1 15.8	261-1 5.09	263-1 5.01	265-1 4.92	10
155-1 9.77	153-1 9.86	151-1 9.95	69-1 13.6	67-1 13.7	68-1 13.6	150-1 10.0	152-1 9.91	154-1 9.82	156-1 9.73	258-1 5.23	256-1 5.32	254-1 5.40	22-1 15.6	20-1 15.7	21-1 15.7	253-1 5.45	255-1 5.36	257-1 5.27	259-1 5.18	10
149-1 10.0	147-1 10.1	145-1 10.2	143-1 10.3	71-1 13.5	70-1 13.5	72-1 13.4	144-1 10.3	146-1 10.2	148-1 10.1	252-1 5.49	250-1 5.58	248-1 5.67	246-1 5.76	24-1 15.6	23-1 15.6	25-1 15.5	247-1 5.71	249-1 5.62	251-1 5.54	15
142-1 10.3	140-1 10.4	138-1 10.5	76-1 13.3	74-1 13.3	73-1 13.4	75-1 13.3	137-1 10.6	139-1 10.5	141-1 10.4	244-1 5.84	242-1 5.93	240-1 6.02	28-1 15.4	26-1 15.5	27-1 15.4	239-1 6.07	241-1 5.98	243-1 5.89	245-1 5.80	15
135-1 10.7	133-1 10.7	81-1 13.0	79-1 13.1	77-1 13.2	78-1 13.2	80-1 13.1	132-1 10.8	134-1 10.7	136-1 10.6	238-1 6.11	236-1 6.20	234-1 6.29	232-1 6.37	30-1 15.3	29-1 15.3	31-1 15.2	233-1 6.33	235-1 6.24	237-1 6.15	15
195-1 8.01	193-1 8.10	191-1 8.18	49-1 14.5	47-1 14.5	46-1 14.6	48-1 14.5	190-1 8.23	192-1 8.14	194-1 8.05	299-1 3.42	297-1 3.50	295-1 3.59	3-1 16.5	1-1 16.6	2-1 16.5	4-1 16.4	296-1 3.55	298-1 3.46	300-1 3.37	20
188-1 8.32	186-1 8.41	184-1 8.49	52-1 14.3	50-1 14.4	51-1 14.4	183-1 8.54	185-1 8.45	187-1 8.36	189-1 8.27	294-1 3.64	292-1 3.73	290-1 3.81	288-1 3.90	6-1 16.4	5-1 16.4	7-1 16.3	289-1 3.86	291-1 3.77	293-1 3.68	20
182-1 8.58	180-1 8.67	178-1 8.76	176-1 8.85	54-1 14.2	53-1 14.3	55-1 14.2	177-1 8.80	179-1 8.71	181-1 8.63	286-1 3.99	284-1 4.08	282-1 4.17	10-1 16.2	8-1 16.3	9-1 16.2	281-1 4.21	283-1 4.12	285-1 4.03	287-1 3.95	20
174-1 8.94	172-1 9.02	170-1 9.11	58-1 14.1	56-1 14.1	57-1 14.1	59-1 14.0	171-1 9.07	173-1 8.98	175-1 8.89	280-1 4.26	278-1 4.34	276-1 4.43	274-1 4.52	12-1 16.1	11-1 16.1	13-1 16.0	275-1 4.48	277-1 4.39	279-1 4.30	30
168-1 9.20	166-1 9.29	164-1 9.38	62-1 13.9	60-1 14.0	61-1 13.9	63-1 13.8	165-1 9.33	167-1 9.24	169-1 9.16	272-1 4.61	270-1 4.70	268-1 4.79	16-1 15.9	14-1 16.0	15-1 16.0	267-1 4.83	269-1 4.74	271-1 4.65	273-1 4.56	30

Элемен. тензор

0

Ранжирование

Ряды

Укладка

Hold

Deck

OK

Рис. 4. Розміщення контейнерів в ярусах

Таким чином, в четвертому розділі дисертації проведено формалізацію задачі оптимізації завантаження контейнеровоза.

Матеріали розділу опубліковано у роботах [3, 4, 6].

У **п'ятому розділі** розроблено метод мінімізації сил інерції хитамиці за рахунок розташування контейнерів у вантажному приміщенні, що являється третьою складовою задачею дисертаційного дослідження, та приведено результати імітаційного моделювання.

В роботі показано, що сила інерції від бортового хитання, діюча на контейнер, залежить від маси контейнера m_c і лінійного прискорення, а модуль її максимального значення $F_{\theta mx}$ залежить від моменту інерції $\bar{J}_x$ судна щодо подовжньої осі X-X, який є сумою моментів інерції судна із запасами $\bar{J}_{xv}$ і від завантаження контейнерів $\bar{J}_{xc}$, тобто $\bar{J}_x = \bar{J}_{xv} + \bar{J}_{xc}$, причому момент інерції $\bar{J}_{xc}$ може формуватися однієї з чотирьох процедур розміщення контейнерів по ярусах вантажного приміщення і двох процедур розміщення контейнерів в ярусі. В розділі також показано, що за інших рівних умов 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 повинне забезпечити екстремальне значення $\bar{J}_x$ щодо подовжньої осі, що проходить через центр тяжіння судна, і залежне від положення вантажного приміщення щодо цієї осі.

Момент інерції $\bar{J}_{xc}$ визначається складовою $Q_p = \bar{J}_{xc}^h + 2\Delta Z \sum_{i=1}^{Nc} m_i z_i$, яка залежить від порядку укладання контейнерів в беях по ярусах і в ярусах.

Оскільки величина Q_p залежить від чотирьох процедур розміщення контейнерів по ярусах в беї і двох процедур укладання контейнерів в ярусі, то з восьми варіантів розрахунку Q_p слід вибрати максимальне Q_{pmx} і мінімальне Q_{pmn} значення і з їх допомогою розраховуються екстремальні значення моменту інерції судна $\bar{J}_{xmx} = Q_c + Q_{pmx}$ і $\bar{J}_{xmn} = Q_c + Q_{pmn}$.

Завершальним етапом мінімізації максимальної сили інерції, діючої на кожен завантажений контейнер, полягає в розрахунку показників $G_1 = (B - \bar{J}_{xmx} \omega_k^2)^2$ і $G_2 = (B - \bar{J}_{xmn} \omega_k^2)^2$, більший з яких визначає вибір однієї з восьми процедур розміщення контейнерів в беях.

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

У розділі приведено приклад восьми варіантів розміщення 300 контейнерів у вантажному приміщенні судна. За допомогою розробленої комп'ютерної програми були розраховані значення величин, що характеризують всі вісім варіантів укладання, причому кожна пара варіантів відповідає одній з чотирьох

процедур формування ярусів, для непарних варіантів укладання контейнерів в ярусі у порядку убавання ваги від центру трюму до бортів, а для парних варіантів - навпаки.

В якості прикладу на рис. 5 показано перший варіант укладання контейнерів у вантажному приміщенні судна, коли вага ярусу зменшується при його розташуванні знизу вверх, а в ярусі укладання контейнерів проводиться у порядку убавання ваги від центру трюму до бортів.

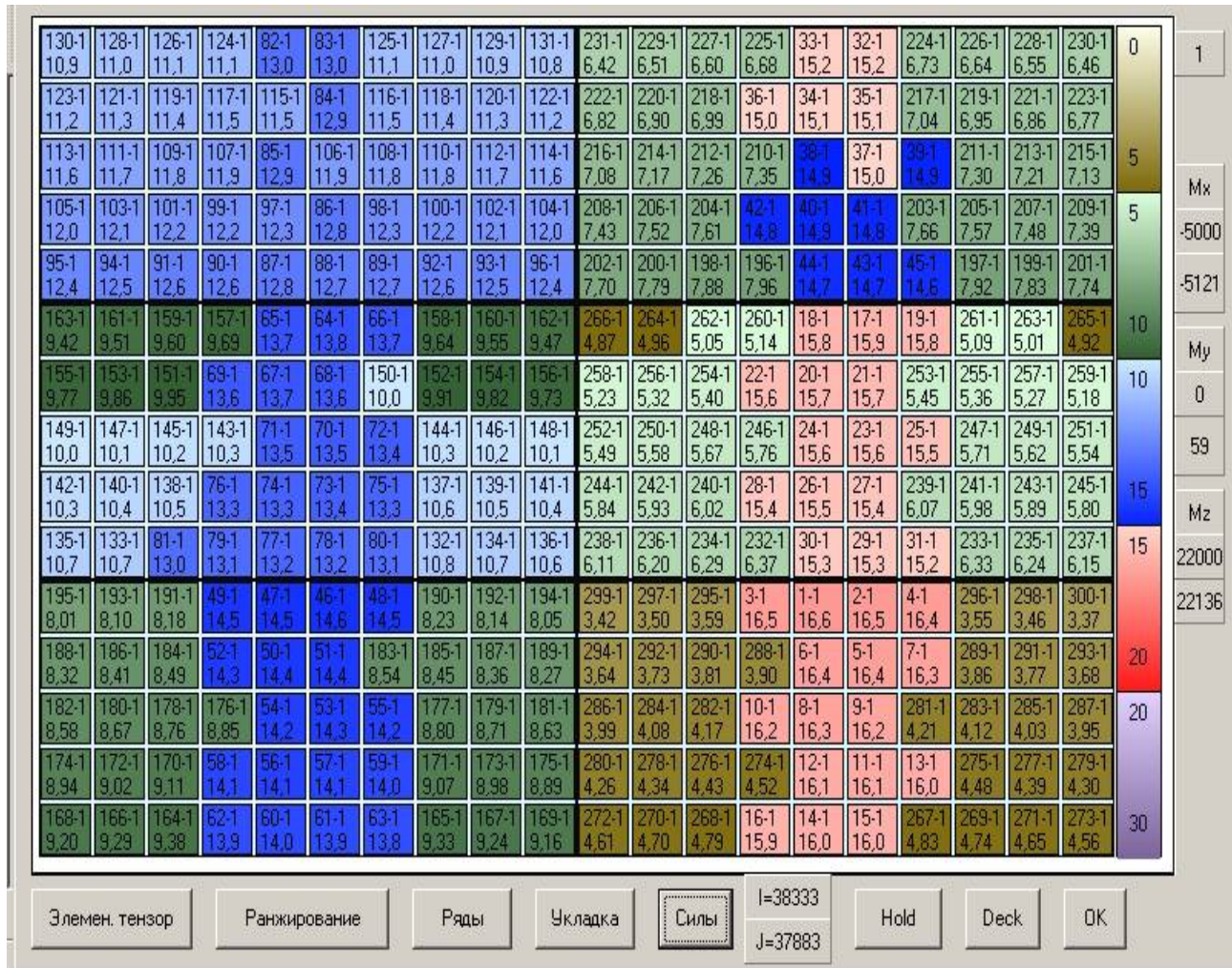


Рис. 5. Розміщення контейнерів при першому варіанті завантаження

За допомогою комп'ютерної програми для $\Delta Z = 6,07$ м і періоду хитання 17 с для всіх восьми варіантів розміщення контейнерів у вантажному приміщенні були розраховані сили інерції, діючі на кожен контейнер, а в якості прикладу на рис. 6 показана дія сил інерції на контейнери при першому варіанті їх розміщення. Максимальна сила інерції, рівна $4,81 \text{ тм/с}^2$, діє на контейнер першого бею, що знаходиться на початку нижнього ярусу.

На рисунку схематичне зображення контейнерів забарвлене в червоний колір, інтенсивність якого пропорційна діючій на нього силі інерції. Контейнер, на який діє максимальна сила інерції, виділений бордовим кольором, а її значення виводиться на інформаційну панель в правому нижньому кутку рисунку.

Результати моделювання восьми варіантів завантаження, які показують залежність максимальної сили інерції від варіанту завантаження, представлені в табл. 2.

Таблиця 2.

Залежність сили інерції F_{0mx} від варіанту завантаження ($\Delta Z = 6,07$ і $\tau_k = 17$)

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8
F_{0mx}	4,81	5,35	6,14	5,35	6,15	5,31	6,19	5,33



Рис. 6. Індикація сил інерції при першому варіанті завантаження

Аналіз приведеної таблиці показує, що мінімальна сила інерції F_{0mx} відповідає першому варіанту завантаження.

В розділі розглянуто завантаження довільної першої партії контейнерів, для розміщення якої може потребуватись різне число вантажних приміщень: від одного до всіх. Також показано результати імітаційного моделювання такого завантаження.

Як приклад в роботі розглянуто формування завантаження судна «Скай Джемені», що може приймати контейнери у вісім трюмів і на їх кришки. У кожному з вантажних приміщень можливо розмістити 192 двадцяти футових контейнера (чотири беї по шість ярусів, кожний з яких містить вісім контейнерів). Планується повне завантаження судна 3072 двадцяти футовими

контейнерами, загальна вага яких складає 45000 т. Вантаж адресується шести портам з послідовністю вивантаження А, В, С, D, Е, F. Як раніше наголошувалося, послідовність завантаження партій контейнерів зворотна послідовності їх вивантаження в портах, тобто першою приймається партія для порту F, а останньої - для порту А.

У табл. 3 приведені характеристики партій контейнерів для кожного з портів.

Таблиця 3.

Характеристики партій контейнерів

Порт	F	E	D	C	B	A
Партія	1	2	3	4	5	6
N контейн.	808	568	544	600	288	264
Вага партії	12150	8550	8100	9000	4050	3150

Завершальне розміщення контейнерів після закінчення їх завантаження по суднових приміщеннях і параметри посадки, остійності та подовжньої міцності, які знаходяться в допустимих межах, показано на рис. 7.

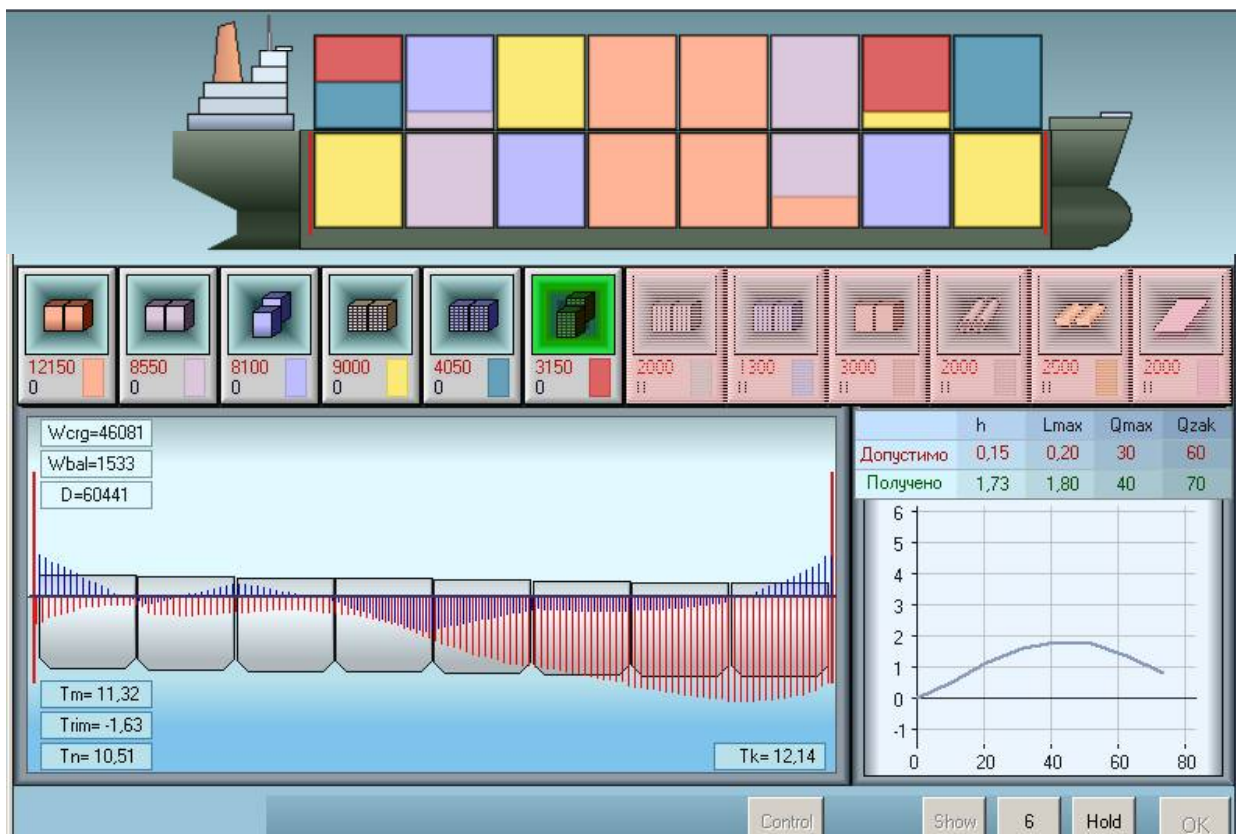


Рис. 7. Розміщення контейнерів і параметри після закінчення завантаження

Таким чином, у п'ятому розділі дисертації розроблено метод мінімізації сил інерції хитамиці за рахунок розташування контейнерів у вантажному приміщенні та імітаційне моделювання завантаження контейнеровозу.

Матеріали розділу опубліковано у роботах [5, 7, 10].

ВИСНОВКИ

Підвищення безаварійності судноводіння сприяє покращенню охорони людського життя на морі та зниженню шкоди навколишньому середовищу. Одним із напрямків підвищення безпечності судноводіння є забезпечення морехідної безпеки суден шляхом їх оптимального завантаження.

У дисертації одержано теоретичне узагальнення і нове вирішення задачі забезпечення безпеки судноводіння шляхом розробки нового методу визначення оптимального послідовного завантаження контейнеровозів згідно ротації портів призначення, що має комп'ютерну реалізацію і відрізняється застосуванням процедури формування тензору завантаження з урахуванням сил інерції, що виникають при хитавиці судна.

У дисертаційній роботі:

- вперше запропоновано метод синтезу теоретичного тензору завантаження судна і формування відповідного реального тензору завантаження для мінімізації сил інерції, що виникають при хитавиці судна;
- удосконалено математичну модель процесу завантаження контейнеровозу з урахуванням сил інерції хитавиці в залежності від осьового моменту інерції судна та виконанням вимог морехідної безпеки;
- удосконалено спосіб формування оптимального завантаження судна партіями контейнерів, який ураховує ротацію портів призначення, для забезпечення безаварійного перевезення вантажу.

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені компанією «Plaz LLC» для розробки суднової технічної документації (акт впровадження №210215-01 від 22.12.2020 р.), приватним підприємством «Авангард Морські Технології і К» для розробки інформацій об остійності контейнеровозів для створення оптимальних варіантів завантаження з метою забезпечення безпеки плавання (акт впровадження від 11.01. 2021 р.) та товариством з обмеженою відповідальністю «КБ «ШИПЯРД» при розробки інформацій об остійності контейнеровозів та суден з варіантами завантаження контейнерами (акт впровадження від 15.10. 2020 р.). Матеріали дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі при викладанні дисципліни «Сучасні засоби управління морехідними якостями судна» (акт від 15.02.2021 р.).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Власенко Е.А. Определение ускорения, возникающего при бортовой качке судна. / Власенко Е.А. // XXX Международная конференция «Развитие науки в XXI веке», 15 декабря 2017г. – Харьков – С. 41-46.
2. Власенко Е.А. Безопасная перевозка груза с учетом качки судна. / Власенко Е.А. // Автоматизация судовых технических средств. – 2018. – № 24. – С. 19-26.

3. Власенко Е.А. Некоторые особенности составления грузового плана контейнеровозов. / Власенко Е.А., Цымбал Н.Н. // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, - 2018. - Вып. 28. – С. 35-41.
4. Власенко Е.А. Определение максимального значения горизонтальной составляющей сил инерций, действующей на груз при качке судна. /Власенко Е.А., Бурмака И.А.// Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VI (18), Issue: 158, 2018. - С. 80- 84.
5. Власенко Е.А. Зависимость сил инерции бортовой качки от момента инерции судна относительно продольного оси. / Власенко Е.А. // Austria - science, Issue: 23, 2019.- С. 54 – 60.
6. Власенко Е.А. Допустимая загрузка контейнеровоза. / Власенко Е.А. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VI(22), Issue: 186, 2018.- С. 87 - 94.
7. Власенко Е.А. Имитационное моделирование загрузки контейнеровоза. / Власенко Е.А., Калиниченко Е.В., Цымбал М.Н. // Austria - science, Issue: 26, 2019.- С. 43 - 49.
8. Власенко Е. А. Загрузка судна с учетом сил инерции, возникающих при переходе/ Власенко Е. А., Бурмака И.А. // Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2017 – Одеса : НУ «ОМА», 2017. – С. 142 – 144.
9. Власенко Е.А. Угловые ускорения, возникающие при качке судна. /Власенко Е.А. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2018): Матеріали X Міжнародної наук.-практ. конф., 29 - 31 травня. 2018 – Херсон: ХДМА, 2018. – С. 96–98.
10. Власенко Е.А. Влияние загрузки судна на величину сил инерции, возникающих при качке. / Власенко Е.А. // Транспортні технології (морський та річковий флот):інфраструктура, судноплавство, перевезення, автрматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 15-16 листоп. 2018 – Одеса : НУ «ОМА», 2018. – С. 110 – 111.

АНОТАЦІЯ

Власенко Є.А. Розробка методу оптимального завантаження контейнеровозу з урахуванням сил інерції хитавиці. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту. - Національний Університет «Одеська морська академія», Одеса, 2021.

В роботі розглянуто спосіб формалізації сил, діючих на вантаж при хитанні судна. Для ізольованих диференціальних рівнянь руху судна одержані аналітичні вирази складових бортового кильового і вертикального хитання судна, за допомогою яких одержані вирази для кутових і лінійних прискорень.

Визначено сумісний вплив сил інерції хитання судна і сили тяжіння на вантаж, що перевозиться, одержані їх проекції на осі суднової системи координат і представлено аналітичний вираз для розрахунку максимального значення горизонтальної проекції сил, що впливають на вантаж.

Розглянуто основні етапи розробки методу формування безпечного завантаження судна з урахуванням вимог по забезпеченню морехідної безпеки судна. Проведено формулювання задачі завантаження судна контейнерами в загальному вигляді і визначена її специфіка.

Для урахування вимог по забезпеченню морехідної безпеки судна проведена формалізація обмежень по його морехідному стану, яка дозволяє знайти допустимі прирости статичних моментів, створюваних вагою контейнерів, що приймаються.

Сформульовано задачу оптимізації завантаження контейнеровоза, яка передбачає оптимізацію завантаження судна перед кожним його переходом. як критерій оптимальності пропонується вага баласту, що приймається, яка повинна бути мінімізованою. Обмеженнями задачі оптимізації є вимоги по забезпеченню морехідної безпеки судна і виникаючим силам інерції при хитанні. Запропонований метод формування допустимого завантаження у разі відсутності необхідності прийому баласту.

Досліджено залежність сил інерції бортового хитання від осьового моменту інерції судна і одержано аналітичний вираз розрахунку максимального значення сили інерції у функції від моменту інерції судна щодо подовжньої осі.

Проведено комп'ютерне моделювання залежності максимальної сили інерції бортового хитання від розміщення контейнерів у вантажному приміщенні судна.

Досліджено завантаження судна партіями контейнерів з урахуванням ротації портів, одержано аналітичні залежності. Проведено імітаційне моделювання завантаження судна «Скай Джемені».

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

АННОТАЦИЯ

Власенко Е.А. Разработка метода оптимальной загрузки контейнеровоза с учетом сил инерции качки. – Квалификационный научный труд на правах рукописи. Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.20 – эксплуатация и ремонт средств транспорта. - Национальный Университет «Одесская морская академия», Одесса, 2021.

В работе рассмотрен способ формализации сил, действующих на груз при качке судна. Для изолированных дифференциальных уравнений движения судна получены аналитические выражения составляющих бортовой, килевой и

вертикальной качки судна, с помощью которых получены выражения для угловых и линейных ускорений.

Определено совместное влияние сил инерции качки судна и силы тяжести на перевозимый груз, получены их проекции на оси судовой системы координат и представлено аналитическое выражение для расчета максимального значения горизонтальной проекции сил, которые действуют на груз.

Рассмотрены основные этапы разработки метода формирования безопасной загрузки судна с учетом требований по обеспечению мореходной безопасности судна. Произведено формулирование задачи загрузки судна контейнерами в общем виде и определена их специфика.

Для учета требований мореходной безопасности произведена формализация ограничений по его мореходному состоянию, которая позволяет найти допустимые приращения статических моментов, порождаемых весом принимаемых контейнеров.

Сформулирована задача оптимизации загрузки контейнеровоза, которая предусматривает оптимизацию загрузки судна перед каждым его переходом. Как критерий оптимальности предлагается вес принимаемого балласта, который должен быть минимизирован. Ограничением задачи оптимизации являются требования по обеспечению мореходной безопасности судна и возникающим силам инерции качки.

Исследована зависимость сил инерции бортовой качки от осевого момента инерции судна и получено аналитическое выражения расчета максимального значения силы инерции в зависимости от момента инерции судна относительно продольной оси.

Произведено компьютерное моделирование зависимости максимальной силы инерции бортовой качки от размещения контейнеров в грузовом помещении судна.

Исследовано загрузки судна партиями контейнеров с учетом ротации портов, получены аналитические зависимости. Произведено имитационное моделирование загрузки судна «Скай Джемени».

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

ANNOTATION

Vlasenko E.A. Development of method of optimum load to containership taking into account forces of inertia of tossing. It is Qualifying scientific labor on rights for a manuscript. Dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering sciences after specialty 05.22.20 - operation and repair of vehicles. - National University «Odessa Maritime Academy», Odessa, 2021.

The method of formalization of forces operating on a load at tossing of ship is considered in basic part of dissertation research. For the isolated differential equalizations of motion of ship the got analytical expressions of constituents of the side careening and vertical tossing of ship, by which the got expressions for angular and linear accelerations.

Certain compatible influence of forces of inertia of tossing of ship and attractive power on a cargo, that is transported, their projections are got on the axis of the ship system of coordinates and analytical expression is represented for the calculation of maximal value of horizontal projection of forces which influence on a load.

In a section basic design times of method of forming of safe load of ship are considered taking into account the requirements after providing of nautical safety of ship. Problem definition of load of ship is conducted by containers in a general view and its specific is certain.

For the account of requirements after providing of nautical safety of ship the conducted formalization of limitations on her nautical state, which allows to find the possible increases of the static moments, created by weight of containers which is adopted.

The task of optimization of loading of containership, which foresees optimization of loading of ship before every her transition, is formulated. As criterion of optimum weight of ballast is offered, that is adopted, what must be minimized. The requirements after providing of nautical safety of ship and nascent forces of inertia at tossing are limitations of task of optimization. Offered method of forming of possible load in the case of absence of necessity of reception of ballast.

Dependence of forces of inertia of the side tossing is explored on the axial moment of inertia of ship and got analytical expression of calculation of maximal value of force of inertia in a function from moment inertia of ship in relation to a longitudinal axis.

The computer design of dependence of maximal force of inertia of the side tossing is conducted from placing of containers in the freight apartment of ship.

The load of ship is explored by parties of containers taking into account the rotary press of ports, got analytical dependences. The imitation design of load of the „Sky Gemini” ship is conducted.

Keywords: nautical safety of ships, loading of containership, tensor of loading of ship, force of inertia of tossing of ship, imitation design of loading of ship.

Підп. до друку 1.04.2021. Формат 60x84/16. Папір офсет.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 1,39.
Тираж 100 пр. Зам. № И21-04-01

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