

Національний університет «Одеська морська академія»
Міністерство науки і освіти України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Цимбал Марія Миколаївна

УДК 628.12.001

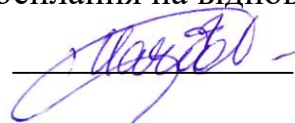
ДИСЕРТАЦІЯ

РОЗРОБКА МЕТОДУ РЕЙСОВОГО ПЛАНУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ КОНТЕЙНЕРОВОЗУ

Спеціальність 05.22.13 – навігація та управління рухом

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
(271–Річковий та морський транспорт)

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 Цимбал М.М.

Науковий керівник к. т. н., доцент Волков О.М.

Одеса – 2021

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 (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.13 – навігація та управління рухом (271–Річковий та морський транспорт). – Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, 2021.

Аналіз літературних джерел, присвячених проблемі забезпечення морехідної безпеки морських суден проведено в дисертаційній роботі, в якій показано, що основні напрями рішення вказаної проблеми полягають в створенні належних морехідних характеристик судна під час його проектування і будівництва, забезпечення допустимого морехідного стану судна на етапі експлуатації шляхом проведення коректних вантажних операцій, за допомогою сучасних технічних засобів контролю значень експлуатаційних параметрів морехідного стану судна.

Вибір основного напрямку дисертаційного дослідження проведено в результаті проведеного аналізу головних проблем морехідної безпеки, який передбачає розробку методу рейсового планування оптимального завантаження контейнеровозу з урахуванням ротації портів заходу.

Мета дисертаційного дослідження і його головна задача вказані в технологічній карті дисертації, причому головна задача представлена трьома незалежними складовими задачами. Проведено формулювання гіпотези дисертаційного дослідження, а також показано, що в результаті рішення незалежних складових задач одержано нові наукові результати.

Можливість впровадження практичних рекомендацій, одержаних в дисертаційній роботі, визначають значимість і практичну цінність дисертаційного дослідження, в роботі також сформульоване загальне наукове положення роботи.

Методика рішення головної задачі дослідження шляхом вирішення складових задач дисертації приведена в роботі, в якій показано поетапне вирішення складових задач, для чого використані сучасні методи аналітичного аналізу та проведено імітаційне моделювання.

В основній частині дисертаційного дослідження наведені аналітичні вирази, що характеризують формалізацію обмежень згідно морського стану судна, які формалізують відповідності вимог по посадці, остійності та загальної поздовжньої міцності судна. Визначено граничні значення статичних моментів судна, які задовольняють вимогам за морським станом судна.

Отримано аналітичні вирази оцінки максимальної величини горизонтальної сили інерції, що діє на вантаж під час хитавиці судна. Для цього наведені формули розрахунку кутових і лінійних прискорень бортової, кильової і вертикальної хитавиці судна.

Досліджено вплив осьового моменту інерції судна відносно поздовжньої вісі на величину сил інерції хитавиці. Отримано залежність сил інерції хитавиці від осьового моменту інерції судна і приведена комп'ютерна процедура визначення сили інерції.

Запропоновано спосіб формування задачі оптимізації завантаження контейнеровозу, в якості критерію оптимальності вибрано кількість прийнятого баласту, формалізовані обмеження морехідної безпеки і діючих сил інерції хитавиці.

Наведена постановка задачі розробки методу формування безпечного завантаження контейнеровозу в загальному вигляді. Сформульовано основні етапи наукового дослідження.

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

Сформульовано вимоги морехідної безпеки судна при розміщенні партій контейнерів завантаження, які формалізовані у вигляді аналітичних виразів. Отримано залежності параметрів посадки і остійності судна від статичних моментів його завантаження, що дозволяють сформувати припустиму множину розміщення контейнерів по вантажним приміщенням судна.

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

Розглянуто частковий випадок завантаження судна контейнерами, коли здійснене перевезення однієї партії контейнерів максимальної ваги із одного порту в інший. Отримано процедури розміщення контейнерів партії по судовим вантажним приміщенням, під час яких виконуються вимоги по остійності, загальній поздовжній міцності і посадці судна. Приведено аналітичні вирази, що реалізовані в згаданих процедурах.

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 поздовжньої міцності.

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

Наукова новизна дослідження 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 розроблено спосіб визначення контейнеру, на який діє максимальна сила інерції хитавиці, в залежності від завантаження судна для оцінки його морехідної безпеки;
- вперше запропонована процедура забезпечення доступності партій контейнерів в порту їх призначення для формування рейсового вантажного плану судна;
- одержали подальший розвиток методів забезпечення вимог морехідної безпеки судна шляхом оптимального розміщення партій контейнерів завантаження для прийому мінімальної кількості баласту.

Даному дисертаційному дослідженню притаманна практична значущість, яка полягає у можливості упровадження його результатів на судна, що перевозять контейнери, для оптимізації їх завантаження, а також використані в практичній роботі суднохідних, агентських, кріюінгових 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 «CMA 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.)

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

Основні результати дисертаційного дослідження здобувача опубліковані в наступних наукових працях:

Основні наукові результати дисертації.

1. Цымбал М.Н. Формирование тензора загрузки контейнеровоза в случае проведения грузовых операций в нескольких портах. / Цымбал М.Н. // Судовождение: Сб. научн. трудов НУ «ОМА», – 2019. – Вып. 29. – С. 35–41.
2. Цымбал М.Н. Расчет рейсового грузового плана контейнеровоза. / Цымбал М.Н. // Судовождение: Сб. научн. трудов НУ «ОМА», – 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.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

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, авторматизація: 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, авторматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 12–13 листоп. 2020 – Одеса : НУ «ОМА», 2020. – С. 146 – 149.

ANNOTATION

Tsymbal M.M. The development of the optimum container carrier loading method during the voyage planning. It is the qualifying scientific work on a manuscript right (dissertation). Dissertation for getting the scientific degree of engineering sciences candidate (Ph.D.) according to speciality 05.22.13 - navigation and traffic control (271-River and marine transport) - National University "Odesa Maritime Academy", Odesa, 2021.

The literature sources analysis regarding the problem of the vessels' seaworthiness providing is conducted in this dissertation. The research shows the basic directions of making the indicated problem decision, which consists of creating the proper seaworthy characteristics of a vessel while project making and building, and is providing the seaworthy of the vessel while planning the voyage by conducting the correct loading operations, with the help of the modern technical control system of the vessel sea state operating parameters.

The main goal of the research is laid out because of the nautical safety main problems conducted analysis, which foresees the development of the optimum container carrier loading method during the voyage planning considering the port of call sequence.

The purpose of the research and its main task is indicated in the technological card; thus, the main task is presented by three independent component tasks. Formulation of the research hypothesis is conducted. Also, as a result of the independent component tasks decision, new scientific results are obtained.

The possibility of the practical recommendations' establishment, which were acquired in the research, determine the meaningfulness and practical value of the research. The general scientific thesis is also formulated in the dissertation.

The method for decision main task of the research is provided by the determination of component tasks and step-by-step solution of component tasks

with the help of the modern methods of analytical analysis usage and conducting the imitation design.

Analytical expressions, which characterize the formalization of limitations in obedience to the vessel's state at sea, which formalize the requirements on landing, stability, and general longitudinal durability of the vessel, are resulted in the basic part of the research assignment. Determined the values of vessel's moments suitable for requirements when vessel at sea.

Analytical expressions of the horizontal inertial force maximum value estimation, which influence the cargo while tossing, are gained. For this purpose, calculation formulas of angular and linear accelerations of side, careening and vertical vessel's tossing are resulted.

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. Seaworthy 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 issue of taking into account the availability of batches of containers to be unloaded during the formation of the enlarged tensor of loading of the vessel is considered. The conditions of availability of consignments to be unloaded are obtained, and the procedures for implementing these conditions are proposed.

Vessel's nautical safety requirements while placing container loading parties are formulated. Requirements are formalized as analytical expressions. Dependences of landing and vessel's stability parameters from its static loading

moments are obtained. These dependences allow to form the possible number of containers' placing on the vessel's loading compartments.

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 partial case of the container vessel's loading is considered, regarding transportation the one party of containers with maximum weight from one port to another. Procedures of the containers party's placing on the ship loading compartments are provided. During these procedures, the requirements on stability, general longitudinal durability and landing of the ship are executed. Analytical expressions which are realized in the mentioned procedures are given.

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.

The scientific novelty of research consists of a new method of the optimum container carrier loading development while forming the voyage plan in obedience to the port of call sequence, that has computer realization and differs by minimization of the taking ballast amount and vessel's inertial tossing forces.

The dissertation research contains:

- for the first time a method was developed to determine the container on which the maximum force of inertia of the wobble acts, depending on the loading of the vessel to assess its maritime safety;

- for the first time the procedure of ensuring the availability of batches of containers in the port of their destination for the formation of the ship's voyage cargo plan is proposed;

- received further development of methods for ensuring the requirements of maritime safety of the vessel by optimal placement of batches of loading containers to receive the minimum amount of ballast.

This assignment research inherent practical meaningfulness, which consists of its' results introduction possibility onboard the ships which transport containers, for optimization of their loading, and are used in practical work of navigational, agency, crewing and other companies.

The practical results of the dissertation research were introduced into the educational process at the Department of Maritime Transport of National University "Odessa Maritime Academy" (act from 28.12.2020), at the Department of Ship Management of Kherson State Maritime Academy (act from 30.12.2020), in the company "CMA SHIPS Ukreine" for retraining of the company's deck officers (act of implementation dated 29.12.2020), the company "UNITEAM MARINE" for retraining of the company's deck officers (act of implementation dated 06.01.2021)

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

The basic research assignment results are published in the following scientific thesis:

Main dissertation scientific results.

1. Цымбал М.Н. Формирование тензора загрузки контейнеровоза в случае проведения грузовых операций в нескольких портах. / Цымбал М.Н. // Судовождение: Сб. научн. трудов НУ «ОМА», – 2019. – Вып. 29. – С. 35–41.

2. Цымбал М.Н. Расчет рейсового грузового плана контейнеровоза. / Цымбал М.Н. // Судовождение: Сб. научн. трудов НУ «ОМА», – 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.

Publications which certify approbation of assignment materials.

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, авторматизація: 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, авторматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 12–13 листоп. 2020 – Одеса : НУ «ОМА», 2020. – С. 146 – 149.

ЗМІСТ

ВСТУП	16
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ ОСНОВНИХ АСПЕКТІВ ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОРЕХІДНОЇ БЕЗПЕКИ СУДЕН ДЛЯ ВИБОРУ НАПРЯМУ ДИСЕРТАЦІЇ	21
1.1 Огляд літературних джерел і аналіз основних напрямків рішення проблеми забезпечення морехідної безпеки суден	21
1.2 Вибір напрямків наукового дослідження.....	34
1.3 Висновки за першим розділом.....	35
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	37
2.1 Обґрунтування вибору напрямку наукового дослідження.....	37
2.2 Методи дисертаційного дослідження	39
2.3 Методика проведення дисертаційного дослідження	43
2.4 Висновки за другим розділом	45
РОЗДІЛ 3. ФОРМУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВАНТАЖНОГО ПЛАНУ КОНТЕЙНЕРОВОЗУ	46
3.1 Формальний опис обмежень згідно з морським станом судна.....	46
3.2 Формування задачі оптимізації завантаження контейнеровозу	54
3.3 Оцінка максимальної величини горизонтальної сили інерції, що діє на вантаж під час хитаючи судна	70
3.4 Висновки за третім розділом	78
РОЗДІЛ 4. МЕТОД РЕЙСОВОГО ПЛАНУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ КОНТЕЙНЕРОВОЗУ З УРАХУВАННЯМ РОТАЦІЇ ПОРТІВ ЗАХОДУ.....	80
4.1 Формулювання завдання в загальному вигляді.....	80
4.2 Врахування доступності партій, які вивантажуються, при формуванні укрупненого тензору завантаження судна	86
4.3 Формування укрупненого тензору завантаження згідно вимог морехідної безпеки судна	94

	15
4.4 Перетворення теоретичного тензору в реальний тензор	107
4.5 Висновки за четвертим розділом.....	114
РОЗДІЛ 5. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАВАНТАЖЕННЯ СУДНА...	116
5.1 Залежність сил інерції хитавиці від завантаження судна	116
5.2 Окремий випадок завантаження судна контейнерами	121
5.3 Імітаційне моделювання завантаження судна «Скай Джемені»...	130
5.4 Контроль плану розміщення контейнерів по вантажних приміщеннях судна за допомогою імітаційної програми	146
5.5 Висновки за п'ятим розділом.....	159
ВИСНОВКИ.....	160
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	162
ДОДАТОК А.	177
ДОДАТОК Б.....	179

ВСТУП

Актуальність теми. Підвищенням 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 торговельного флоту. До таких питань відноситься забезпечення морехідного стану судна, яке у визначальній мірі залежить від коректності його завантаження.

При завантаженні 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 про можливість 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 рішення 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 при 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 розроблено спосіб визначення контейнеру, на який діє максимальна сила інерції качки, 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 методу забезпечення вимог морехідної безпеки судна шляхом оптимального розміщення партій контейнерів завантаження для прийому мінімальної кількості баласту.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості упровадження його результатів на судна, що перевозять контейнери, для оптимізації планування їх рейсового завантаження, а також використані в практичній роботі агентських, суднохідних, кріїнгових 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 «CMA 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, розроблений 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 [95].

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, 14–15 листоп. 2019 р.), XI Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT–2019)» (Херсон, 28 – 30 травня 2019 р.), науково-технічна конференція «Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» (Одеса, 12–13 листопада 2020 р.) і XII Міжнародна науково-практична конференція «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), у тому числі: в наукових профільних виданнях, що входять до переліку МОН України – 3 наукові статі

[132-134]; в зарубіжних наукових профільних виданнях – 2 наукові статті [95, 135]; в збірниках матеріалів наукових конференцій – 4 доповіді [136-139].

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

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ ОСНОВНИХ АСПЕКТІВ ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОРЕХІДНОЇ БЕЗПЕКИ СУДЕН ДЛЯ ВИБОРУ НАПРЯМУ ДИСЕРТАЦІЇ

1.1 Огляд літературних джерел і аналіз основних напрямків рішення проблеми забезпечення морехідної безпеки суден

Однією із найбільш актуальних проблем судноводіння є забезпечення морехідної безпеки судна, рівень якої характеризується відповідністю його параметрів остійності, посадки і міцності допустимим нормативним значенням.

Необхідні морехідні якості забезпечуються при будівництві судна, а на етапі експлуатації на них впливають розташування вантажу, запасів і баласту, а також кріплення вантажу.

Як показав аналіз літературних джерел, основними напрямками підвищення морехідної безпеки судна являються забезпечення його морехідних характеристик під час будівництва судна, а в процесі його експлуатації забезпечення допустимого морехідного стану шляхом коректного завантаження та оперативного контролю параметрів морехідного стану судна сучасними бортовими системами.

Загальним питанням забезпечення морехідного стану судна і основній проблемі теорії корабля присвячені роботи [1-7], причому в них детально розглянуті основні питання остійності, плавучості, посадки і міцності суден.

Домінуючі фактори виникнення аварій малих суден вказані у роботі [8] та описані основні напрями зниження їх ризику впливу через дефіцит остійності чи плавучості. Запропоновано постановку задачі поточного контролю остійності судна для підвищення безпеки мореплавання.

Методу рішення задачі непотоплюваності судна, яка є нелінійною та просторовою, шляхом використання бортових ЕОМ присвячено публікацію [9].

Дослідження кореляційної залежності між формою корпусу судна і його діаграмою статичної остійності приведено в роботі [10]. Запропоновано апроксимовану формулу розрахунку метацентричної висоти і досліджено задачу синтезу форми корпусу із заданою величиною метацентричної висоти. Розглянуто питання нормування непотоплюваності катамаранів стосовно аварійної остійності.

В роботі [11] пропонується розробка динамічної моделі небажаної зміни небезпечних чинників аварії судна, а в статті [12] щодо остійності судна і діаграми динамічної остійності судна розглядається розрахунок критерію погоди згідно альтернативним вимогам Кодексу ІМО.

Метод і вирази для оцінки похибок контролю остійності суден запропоновано в публікації [13], а роботу [14] присвячено виявленню чинників зміни остійності суден в процесі експлуатації.

Спосіб визначення остійності судна при великих нахилах та дослідження точності розрахунку плечей остійності форми описано у публікації [15], а в статті [16] розглянуто метод контролю остійності судна, який використовує спектральну щільність процесів хвилювання і бортової хитавиці судна, що дозволяє провести розрахунок власного періоду бортової хитавиці і визначити метацентричну висоту судна.

Дослідженню математичної моделі поведінки вантажу, який під час хитавиці судна пружно зміщується, наприклад, катанка в бухтах, що завантажена навалом, присвячено роботу [17]. Приведено математичну модель поведінки такого вантажу і розроблено методику оцінки остійності судна в такій ситуації.

Спосіб розрахунку параметрів статичної посадки судна в умовах хвилювання запропоновано у публікації [18], за допомогою якого проводиться коректування зміряних середніх значень, що підвищує точність визначення параметрів статичної посадки судна.

В роботі [19] пропонуються рекомендації коректування правил споруди і класифікації суден внутрішнього плавання Дунайським регіоном, які

засновані на аналізі існуючих міжнародних вимог, а також ризиків експлуатації суден в разі перевезення небезпечних вантажів навалом, наливом і в упаковці.

В статті [20] приведено алгоритм пакету програм SHIP і його база даних, який призначений для комп'ютерного розрахунку оптимального вантажного плану і оцінки непотоплюваності судна.

Система автоматизованого контролю напруг корпусу судна пропонується у патенті [21], яка складається із вимірювальних датчиків, що розміщуються в передбачених точках корпусу, і компенсаційного датчику. В склад системи також входять дистанційні блок вимірювань даних і блок індикації і реєстрації.

Зіставлення оцінок довговічності моделей корпусних вузлів, одержаних за допомогою існуючих методів, з експериментальними даними їх утомленості приведено в роботі [22].

У роботі [23] пропонується Доповнення вантажної шкали спеціальними поправками на диферент, що забезпечують достатньо точне і швидке визначення водотоннажності судна з урахуванням густини заборотної води, перегину судна, і його диференту.

Методика розрахунку за допомогою спрощених аналітичних алгоритмів напруг і деформацій при скручуванні корпусів суден, що полегшує формування завершальних висновків, запропонована в роботі [24].

Фізичні моделі корпусів суден для комп'ютерних розрахунків їх загального напруженого стану при дії інтегральних параметрів зовнішніх навантажень розглянуто в статті [25]. Для розрахунку напруг при поперечному вигині використовувалась модель заміни згинаючого моменту еквівалентними зусиллями.

Опису схеми навантажень моделей, що ослаблені вирізами, присвячена робота [26], в якій визначений найбільш ефективний тип підкріплення вирізів в корпусі судна при дії значних сил перерізання.

Спосіб оцінки місцевої міцності корпусів морських суден запропоновано у статті [27], який засновано на результатах обробки даних дефекації листових конструкцій з урахуванням вимог Регістру. В результаті аналізу розрахунків виявилось, що висока точність оцінки міцності забезпечується при дотриманні правил Німецького Ллойда.

Публікація [28] присвячена тенденціям зміни задач перевірконого розрахунку на задачі проектувального розрахунку, для вирішення яких застосовуються методи оптимізації і математичного моделювання.

Визначення міцності замкового з'єднання при локальному контакті металевої панелі в напрямі, який перпендикулярний площині панелі, розглянуто в роботі [29].

В роботі [30] розглянуто урахування гнучкості корпусу при розрахунках посадки і елементів вигину судна за допомогою наближеної оцінки в разі розрахунку завантаження судна на судових ЕОМ.

В роботі [31] пропонується використання деформаційного і енергетичного підходів для вираховування обох стадій руйнування конструкцій і нерегулярність виникаючого навантаження, а в роботі [32] розглянуто спосіб уточненого розрахунку водотоннажності і кількості вантажу за допомогою поправок до водотоннажності і на вигин корпусу, враховуючи крен судна.

Результатам проведених теоретичних і експериментальних досліджень податливості вузлових з'єднань присвячена робота [33], в якій також розглянуто методику розрахунку стрижньових систем.

В роботі [34] розглянуто питання розрахунку меж множини можливих стратегій проведення вантажних операцій навалювальних суден, а оптимізацію завантаження транспортних засобів розглянуто в роботі [35].

Стаття [36] присвячена деяким аспектам оптимального завантаження навалювальних суден.

Алгоритм розрахунку оперативної оцінки зміщуючих зусиль і навантажень на кріплення палубного вантажу і рекомендації, які носять

універсальний характер відносно варіантів завантаження типів і розмірів суден приведені у статті [37].

Проблема оптимізації завантаження генеральних вантажів висвітлена у роботах [32-42], а в статтях [43, 44] розглянуто питання оптимального завантаження навалювальних суден. В роботах [45, 46] розглянуто питання упаковки і розміщення вантажів.

Публікація [47] присвячена перспективності використання магнітних методів дефекації суднових конструкцій. В ній одержано залежність між рівнем пластичної деформації і величиною магнітної проникності сталі, що дозволило розробку методики для дефекації конструкцій із залишковими деформаціями.

Питання підготовки до завантаження і перевезення цементу насипом розглянуто у роботі [48], та описані етапи зачистки трюмів судна з метою їх підготовки до прийому чергового вантажу, а в публікації [49] приведено розподіл пошкоджень суден під час проведення швартових операцій.

Питанням розробки системи поточного автоматичного контролю безпеки судна стосовно втрати плавучості і остійності в умовах шторму розглядаються в роботі [50], в якій також пропонуються кількісні оцінки стану судна і створений макетний зразок бортового комплексу попередження небезпеки, що розроблений на основі розглянутої системи та пройшов натурні випробування на великомасштабних моделях натурних суден.

Як показано в роботі [51], під час розрахунку динаміки сучасного важкого суднового устаткування можна нехтувати впливом контактної податливості через дію ударного навантаження.

Аналіз зміни параметрів посадки, остійності, міцності судна та оцінка небезпеки, що виникають через зміну баласту в морі для 50 типових проектів суден проведено у роботі [52], на базі якого запропоновано рекомендації по зниженню ризику втрати мореплавства судна при зміні баласту у відкритому морі. В роботі [53] досліджено вплив спектрів хвилювання на згинаючий момент, що виникає в корпусах суден під час шторму.

Дані про пошкодження суден вітчизняних і іноземних дослідників та класифікаційних організацій приведені в роботі [54], а в статті [55] розглянуто систему безперервного контролю напруженого стану корпусу судна, що сприяє підвищенню безпеки експлуатації судна в морських умовах стосовно міцності корпусу і дозволяє одержати значний економічний ефект збільшенням дозволеної вантажопідйомності.

В результаті моделювання ризику переломів корпусів суден системи Дунай–Майн–Рейн з позицій економічних наслідків аварій в роботі [56] обґрунтовано висновок про необхідність підвищення стандарту загальної міцності для суден, зайнятих перевезенням небезпечних вантажів.

Методика розрахунку інтенсивності допустимого хвилювання для забезпечення безпеки суден з динамічними принципами підтримки запропонована в роботі [57], в якій, крім того, розроблено оцінку впливу цієї інтенсивності на повторюваність навантажень, що впливають на міцність конструкцій судна від втоплення металу.

Робота [58] присвячена результатам досліджень пружно–пластичного вигину корпусу в жорстких зв'язках, що перевищують деформації текучості, при урахуванні поперечного навантаження і початкового прогинання поздовжніх ребер корпусу судна.

Метод розрахунку коефіцієнту запасу місцевої міцності корпусу судна розглянуто у роботі [59]. Показано, що для цього визначається максимум функції безпеки корпусу і можливість локального руйнування окремих його елементів при урахуванні обмежень на матеріаломісткість корпусу.

Узагальнення результатів досліджень по міцності сполучної конструкції катамаранів внутрішнього плавання проекту P19 приведено в публікації [60]. На їх підставі розроблено методику розрахунків міцності катамарану.

Аналіз проблеми нормування міцності судна виконано у роботі [61], причому вперше виділено етап перед руйнуванням в циклічному процесі навантаження–руйнування, а в роботі [62] приведена методика розрахунку перегину і згинаючого моменту судна, у якого сильно пошкоджений корпус.

В публікації [63] для підвищення якості оцінки міцності, безпеки суднового корпусу та його оптимізації проведено обґрунтування необхідності перегляду існуючих схем нормування міцності корпусних конструкцій з урахуванням сучасних комп'ютерних технологій.

Рішення задачі лінійної пружності для напівнескінченного середовища з одним порожнистим сферичним включенням одержано у статті [64]. Для дії зовнішнього тиску одержані значення напруженого стану включення, що знаходиться поблизу поверхні середовища.

Результати розробки для одного із типових вогнищ концентрації напруг в конструктивних вузлах суднового корпусу, які одержані на базі кривих утомленості, наводяться у публікації [65], а в роботі [66] приведено значення залишкових деформацій ребер жорсткості палуби, що одержані на базі статистичної обробки результатів обстеження суден, за якими визначено залежності розрахункових навантажень від параметрів грейферів і сформульована умова неприпустимості значних величин залишкових деформацій.

Кавітаційна стійкість мідних сплавів, які вживаються для виготовлення суднових гвинтів, досліджується у роботі [67]. В роботі [68] запропоновано розрахунок корпусу судна на стійкість методом модуль-елементів, який виключає недоліки оболонкової моделі, а в публікації [69] наголошується, що поздовжній радіус інерції мас судна по-різному впливає на його параметри хитавиці і хвильовий згинаючий момент, як показали проведені систематичні розрахунки. В роботі показано, що несиметричний розподіл навантаження щодо міделю змінює згинаючий момент від морського хвилювання в широких межах та не впливає на параметри хитавиці судна, його посадки, моменти на тихій воді і ударні моменти. Показано, що при оптимальному значенні радіусу інерції досягається мінімум сумарного згинаючого моменту.

В роботі [70] розглянуто розрахункові моделі стану основних типів конструкцій льодових потовщень, за допомогою яких одержано

апроксимуючі вирази для проектування конструкцій на бажане льодове навантаження.

Використання засобів контролю завантаження на судах різних типів і питання нормативних вимог розглянуто в статті [71], в якій запропоновано класифікацію суднових засобів автоматизації, заснованих на методі формальної оцінки безпеки, і спрощену методику визначення згинаючих моментів та перерізуючих сил.

Доцільність застосування подвійних бортів у вигляді балочних фермових конструкцій на судах льодового плавання обґрунтовано у публікації [72], а в роботі [73] приведено аналіз досвіду оглядів механізмів і систем нафтоналивних суден, вік яких більше 20-ти років в рамках процедури CAP, що широко застосовується класифікаційними установами з метою отримання достовірної оцінки фактичного стану старих суден.

Вибір стратегії завантаження судна з урахуванням укладання генерального вантажу розглянуто в статті [74], а в роботі [75] запропоновано процедуру вибору типів генеральних вантажів і введення параметрів при моделюванні їх укладання у вантажні приміщення судна. Спосіб вибору завантаження судна генеральними вантажами методом відображення укладання партій вантажу у вантажних приміщеннях судна розглянуто в роботі [76], причому процедура відображення параметрів посадки, остійності і загальній подовжній міцності у вантажній комп'ютерній програмі судна описана в роботі [77]. Також розробці процедури графічного тривимірного відображення укладання генерального вантажу в трюмах судна присвячена стаття [78].

В статті [79] запропоновано процедуру введення в початкову базу даних судна параметрів стандартних трюмів, як об'єктів вантажних операцій, а процедуру введення характеристик нестандартних трюмів в початкову базу даних судна описано в публікації [80]. Метод введення основних характеристик судна в початкову базу даних описано в роботі [81].

В роботі [82] проведено аналіз загальних залежностей параметрів мореплавства судна від початкових даних. В роботі [83] здійснено опис програмного модуля формування вантажної програми судна за допомогою наявної бази даних методом імітаційного моделювання, а загальний спосіб розробки програмного продукту для формування вантажної програми судна з оцінкою критеріїв його мореплавства по заданому завантаженню запропоновано в роботі [84]. Робота [85] присвячена способу введення характеристик танків у вантажну базу даних судна.

В роботі [86] розглянуто завантаження судна з урахуванням сил інерції, що виникають під час переходу, а статтю [87] присвячено визначенню прискорень, які виникають в результаті бортової хитавиці судна. Особливості планування завантаження контейнеровозу розглянуто в публікації [88], в якому враховується ротація портів, а спосіб безпечного завантаження контейнеровозу, який задовольняє вимогам морехідності, запропоновано в роботі [89].

Питання безпечного перевезення вантажу з урахуванням хитавиці судна досліджено в статті [90], а в роботі [91] досліджено вплив завантаження судна на величину сил інерції, що виникають під час хитавиці. Спосіб визначення найбільшого значення горизонтальної складової сил інерції, яка діє на вантаж під час хитавиці, запропоновано в роботі [92], а кутові прискорення хитавиці судна розглянуто в публікації [93].

Залежність сил інерції бортової хитавиці судна від моменту інерції судна відносно поздовжньої вісі розглянуто в статті [94]. Результати імітаційного моделювання завантаження контейнеровозу приведено в роботі [95]. Питання упаковки і розміщення вантажів розглянуто в публікаціях [96, 97].

В статті [98] приведено результати комп'ютерного статистичного моделювання методом Монте–Карло залежностей параметрів хвилювання, вітру і хитавиці при втраті остійності на попутному хвилюванні малого траулера.

Фірмою MAST Systems Ltd., як повідомляється у роботі [99], розроблено пакет програм MastSystem4 з метою розрахунків остійності непошкоджених і аварійних суден, що має великий попит через необхідність періодичного контролю параметрів остійності і простоти виконуваних операцій.

На величину аварійної остійності судна істотно впливає об'єм води, що поступає зовні, на що вказується у роботі [100], причому виконано теоретичне дослідження ефекту вільної циркуляції води та одержано формули оцінки аварійної остійності судна, а в роботі [101] повідомляється про створення нового типу кораблів протимінної оборони, – це стало можливим через досягнутий за останні роки прогрес в розробці багат шарових конструкцій з склопластику та способу оптимізації корпусів суден на повітряній подушці.

В роботі [102] відображено результати експериментальних досліджень несучої здатності трубчастих зразків, які були проведені в університеті міста Хіросіма, причому дослідження проводилися для різних варіантів навантаження за наявності втомних пошкоджень, а залежність напруженості і місцевої міцності шаруватих композиційних матеріалів від дії температурних коливань аналізується у роботі [103]. В статті [104] представлено результати аналізу розрахунків надійності суднового валопроводу, в яких ураховано ряд суттєвих чинників.

В статті [105] досліджено результати ударної дії, які отримані при випробуванні двох видів матеріалів, та показано, що руйнування, пов'язані із зволоженням, схильні значно зменшити ударну стійкість матеріалів.

Аналізу досвіду компанії BP Shipping стосовно організації контролю стану корпусів п'яти багатотоннажних танкерів, побудованих японською фірмою Mitsubishi у середині 70-х років, присвячено публікацію [106], в якій надавалася особлива увага вивченню крихкого розтріскування конструкцій танкера при дії екстремальних динамічних навантажень і утворенню втомних тріщин через дію хвилювання.

Комп'ютерну програму і методику розрахунків деформації суднових корпусних конструкцій представлено у статті [107], причому їх коректність підтверджено натурними спостереженнями.

В публікації [108] описується досвід використання Німецьким Ллойдом існуючих чисельних методів оцінки міцності судна та визнано найбільш ефективним метод кінцевих елементів, а в публікації [109] приведено результати дослідження кореляційної залежності між формою корпусу судна і діаграмою його статичної остійності.

Використовуючи багаторічний досвід експлуатації суден в арктичних районах плавання сформовано статистичний матеріал, на базі якого розроблено методи розрахунків запасу надійності суднових конструкцій, чому присвячена стаття [110].

Спосіб забезпечення плавучості аварійного судна типу RO-RO і поромів запропоновано у патенті [111], згідно якому передбачено використання закритих місткостей, встановлених по бортах і під палубою вздовж і поперек судна, що забезпечить плавучість аварійного судна при появі неприпустимого крену, а в публікації [112] запатентовано судно з двома парами поплавків, закріплених до корпусу балками, які під час хитами судна забезпечують йому необхідну остійність.

Робота [113] присвячена нестандартній ситуації появи крену двокорпусних танкерів в процесі вантажних операцій, виникаючого через порушення послідовності заповнення і осушення баластних і вантажних танків, яка передбачена вантажними інструкціями. Розглянуто міри забезпечення необхідної остійності в такій ситуації.

Розрахунок подовжніх і поперечних горизонтальних напружностей великотоннажних танкерів методом кінцевих елементів представлено в роботі [114]. За його допомогою можливо точне обчислення внутрішніх зусиль подовжніх і поперечних площинно-рамних зв'язків. Розроблено систему для програмування розрахунків конструкцій великотоннажних танкерів, яка дозволяє ефективніше застосовувати обчислювальну техніку.

Опису методу інтегрування вірогідності, якому не властиві недоліки типових способів оцінки конструкційної надійності присвячена стаття [115], в якій функція граничних положень має нелінійний характер через нерівномірний розподіл змінних величин.

Метод розрахунку вірогідності збереження остійності пошкодженого судна запропоновано в роботі [116], також приведено аналіз розрахунку остійності аварійного судна. В [117] запатентовано корисний пристрій для забезпечення додаткової плавучості морського судна, що складається із труб змонтованих навколо корпусу судна, в яких можливе нагнітання повітря для збільшення плавучості судна.

В статті [118] розглянуто критичну ситуацію положення судна, яка виникає в умовах параметричного резонансу при попутному хвилюванні. Сформульовано умови перекидання судна в такій ситуації та наведено чисельний приклад.

Модель бортової хитавиці суден з розташуванням приміщень, які врівноважують одне одного в разі затоплення їх частини, приводиться в роботі [119] і проведено її дослідження. Результати дослідження остійності накатних суден, що схильні до втрати остійності завдяки їх конструкції, викладено в роботі [120]. Для оцінки живучості пошкодженого накатного судна використана удосконалена модель руху судна під час хвилювання, коректність якої підтверджена хорошою збіжністю експериментальних даних з результатами моделювання.

В публікації [121] повідомляється, що пакет програмного забезпечення, який розроблено Польським морським реєстром підвищує оперативність точних розрахунків міцності корпусів суден завдяки використанню методу кінцевих елементів. Вказаний програмний пакет забезпечує оперативне і ефективне моделювання конструкції корпусу, а також рішення і аналіз рівняння рівноваги.

Для аналізу надійності межі міцності корпусу судна, як указується в роботі [122], необхідно врахування діючих навантажень, інтенсивності

пошкоджень корпусу, граничну міцність матеріалів і обраний метод аналізу надійності. В статті також розглядається модифікований і доповнений метод статистичних випробувань Монте-Карло.

В роботі [123] запропоновано алгоритм розрахунку параметрів реакції конструкції судна для трьох вимірювань на комбіновану дію навантажень адаптованим методом кінцевих елементів. Розрахунок проводиться з урахуванням відповідних сил перерізання, гідростатичних згинаючого і скручуючого моментів.

У статті [124] узагальнюються Матеріали симпозіуму «Майбутнє балкерів», який був організований Det Norske Veritas для обговорення нових вимог ІМО/IACS відносно балкерів. Прогнозується зростання вартості споруди балкерів в цілому на 3-5% і зменшення валової вантажопідйомності на 0,5-1,5%, що обумовлено вимогами необхідності подвійної бортової обшивки корпусів балкерів.

В публікації [125] приведено відомості про багатоцільовий вантажний лайнер Rickmers Shanghai, який є четвертим в серії дев'яти суден дедвейтом 30000 т, замовлення на споруду яких одержали верфі Китаю. Особливістю конструкції даних суден являються пересувні твіндеки, що дозволяють змінювати розташування вантажів по висоті.

Система контролю напруг SENSFIB для моніторингу втомних напруг в корпусах суден описано в публікації [126]. Вона забезпечує оптимальну організацію завантаження суден і розміщення баласту, а також запобігає деформації корпусу, його пошкодженням, для чого в системі застосовуються оптико-волоконні елементи та датчики напруг.

Спосіб підкріпленої панелі, метод розрахунку граничної міцності поздовжніх балок корпусу судна і процедура розрахунку діаграми навантажень і аналізу послідовного руйнування відносно відомих початкових деформацій і напругах описуються в роботі [127]. Спосіб розрахунку остійності малих суден з незвичайними обводами корпусів розглянуто у

статті [128], причому приведено програму розрахунку остійності такої категорії суден.

Роботи [95, 132-139], які виконанні автором особисто або в співавторстві, присвячені оптимальному завантаженню контейнеровозу з урахуванням сил інерції від хитаючи судна.

1.2 Вибір напрямків наукового дослідження

Проведений аналіз літературних джерел за проблемою морехідної безпеки забезпечує можливість виявлення сучасних тенденцій її вирішення і напрям дисертаційного дослідження.

Питанням остійності і посадки суден присвячено значну частину проаналізованих робіт, розробці способів оцінки остійності для нестандартних типів вантажів і аналізу існуючих комп'ютерних програм для розрахунку параметрів остійності. Розроблено рекомендації для двокорпусних танкерів по забезпеченню їх остійності в процесі вантажних і баластних операцій, а також для критичних ситуацій приведена методика розрахунку остійності для накатних суден.

Переважає число публікацій присвячено питанням розрахунку і забезпеченню загальної поздовжньої і місцевої міцності корпусу судна. До основних питань цього напрямку належать розробка алгоритмів розрахунку міцності корпусу пошкодженого судна та способів розрахунку міцності судна щодо контролю накопичених пошкоджень і втомних. В частині робіт розглянуто методи контролю міцності корпусу судна системами моніторингу механічних напруг корпусу судна, в яких задіяні відповідні датчики.

На суднах зараз використовуються сучасні комп'ютерні вантажні програмами, які дають змогу визначати параметри посадки, остійності і поздовжньої міцності судна в залежності від розміщення вантажу по приміщеннях, а також баласту і запасів по танках. У вантажних програмах

операція розміщення вантажів на судні передбачає введення ваги вантажу у відповідне вантажне приміщення, за винятком завантаження контейнеровозів. Десяток робіт присвячено плануванню завантаження контейнеровозів з урахуванням ротації портів вивантаження та сил інерції, що впливають на вантаж під час хитаючи, але постановка задачі передбачає завантаження лише в одному порту без прийому вантажу в проміжних портах. Це допущення спрощує задачу і вирішує практичну проблему лише частково для обмеженої множини ситуацій завантаження, тому основним напрямом дисертаційного дослідження є розробка методу оптимального завантаження контейнеровозу вільного від перелічених недоліків.

1.3 Висновки за першим розділом

Розділ присвячений огляду і аналізу літературних джерел стосовно проблеми забезпечення і підвищення морехідної безпеки суден, з якого витікає, що до основних напрямів рішення даної проблеми належать забезпечення потрібних морехідних характеристик судна при його будівництві, на етапі експлуатації шляхом проведення коректних завантажень досягати лише безпечного морехідного стану судна та за допомогою сучасних технічних засобів здійснювати поточний контроль експлуатаційних параметрів морехідного стану судна.

Проблему забезпечення остійності суден необхідного рівня і її різні аспекти розглянуто в багатьох публікаціях, та досліджуються питання проектування надійних навалювальних суден і забезпечення їх безаварійного мореплавства в процесі експлуатації.

Значну кількість робіт присвячено дослідженню питань забезпечення непотоплюваності і посадки судна. В результаті огляду літератури встановлено, що більшість літературних джерел присвячено питанням місцевої і загальної міцності корпусу судна і різним способам її розрахунку і контролю. Новий перспективний напрям забезпечення поздовжньої міцності

корпусу судна складають сучасні методи контролю міцності його конструкцій.

Проводяться дослідження і розробляються практичні додатки по темі забезпечення морехідної безпеки суден в процесі експлуатації і при виконанні вантажних робіт.

В цьому розділі на базі проведеного аналізу головних проблем морехідної безпеки вибрано основний напрям дисертаційного дослідження.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

2.1 Обґрунтування вибору напрямку наукового дослідження

Як показано в попередньому розділі, однією із найбільш важливих проблем забезпечення морехідної безпеки контейнеровозів є планування їх завантаження, яке має враховувати ротацію портів при завантаженні або вивантаженні в декількох портах та сили інерції хитавиці. Тому основним напрямом дисертаційного дослідження є рейсове планування завантаження контейнеровозів з урахуванням послідовності портів заходу, прийому і вивантаження партій контейнерів та виникаючих сил інерції, що впливають на вантаж через хитавицю під час переходу між портами.

Для вирішення вказаної задачі необхідно, по-перше, застосування аналітичних залежностей для оцінки значень сил інерції, що впливають на вантаж в умовах хитавиці.

По-друге, урахування вимог щодо забезпечення морехідної безпеки судна потребує проведення формалізації обмежень відносно його морехідного стану, з допомогою якої знаходяться допустимі прирости статичних моментів від ваги контейнерів. Також слід сформулювати задачу оптимізації завантаження контейнеровозу перед кожним його переходом та дослідити залежність сил інерції бортової хитавиці від поздовжнього осьового моменту інерції судна.

Надалі необхідно провести комп'ютерне моделювання залежності максимальної сили інерції бортової хитавиці від розміщення контейнерів у вантажному приміщенні судна.

Таким чином, проблема планування оптимального рейсового завантаження контейнеровозу з урахуванням ротації портів призначення та сил інерції хитавиці є перспективною і актуальною, чим і обумовлюється

вибір теми дисертації, яка має наступне формулювання: «Розробка методу рейсового планування оптимального завантаження контейнеровозу».

Для вирішення задачі по зазначеній проблемі необхідно розглянути наступні питання:

- методами системного підходу здійснити декомпозицію головної задачі дисертаційної роботи на складові задачі;

- провести розробку способу завантаження контейнеровозу, що передбачає оптимізацію розміщення його партій контейнерів перед кожним наступним переходом протягом рейсу з мінімальним прийомом баласту;

- визначити залежність сил інерції бортової хитавиці від поздовжнього осьового моменту інерції судна;

- розробити алгоритми імітаційного моделювання для перевірки коректності запропонованого методу завантаження судна.

Актуальність тематики дисертаційного дослідження визначається необхідністю підвищення рівня морехідної безпеки та вдосконаленням методів планування завантаження суден.

Розробка методу оптимізації завантаження контейнеровозу та процедури визначення залежності сил інерції бортової хитавиці від поздовжнього осьового моменту інерції судна можуть скласти наукову новизну дисертаційного дослідження.

Можливе підвищення доходів від оптимального завантаження контейнеровозу складає економічну ефективність дисертаційного дослідження.

Можливість реалізації запропонованого наукового дослідження забезпечуються розробкою теоретичної частини роботи та її перевірки за допомогою імітаційного моделювання.

Об'єктом дослідження роботи являється морехідна безпека суден.

Предметом дослідження є методи оптимального завантаження суден.

2.2 Методи дисертаційного дослідження

На рисунку 2.1 приведено технологічну карту методологічного забезпечення дисертаційного дослідження, яка обґрунтовує шлях вирішення головної задачі дисертації методами системного підходу.

Сучасними запитами практики є необхідність підвищення рівня морехідної безпеки суден та розробки сучасних методів визначення їх оптимального завантаження.

Метою дисертаційного дослідження являється підвищення морехідної безпеки суден шляхом розробки методу рейсового планування оптимального завантаження контейнерів.

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

Головна задача дослідження полягає в розробці алгоритмів і програми визначення оптимального завантаження контейнеровозів.

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 хитами від завантаження судна.

Перша складова задача дисертаційного дослідження полягає в забезпеченні вимог морехідної безпеки судна при розміщенні партій контейнерів завантаження. Її вирішення потребує розробки процедур планування розміщення контейнерів з урахуванням їх ваги по беям, ярусам і рядам, що забезпечує величину виникаючих статичних моментів, вигинаючих моментів та перерізуючих сил, які задовольняють вимогам морехідної безпеки судна.

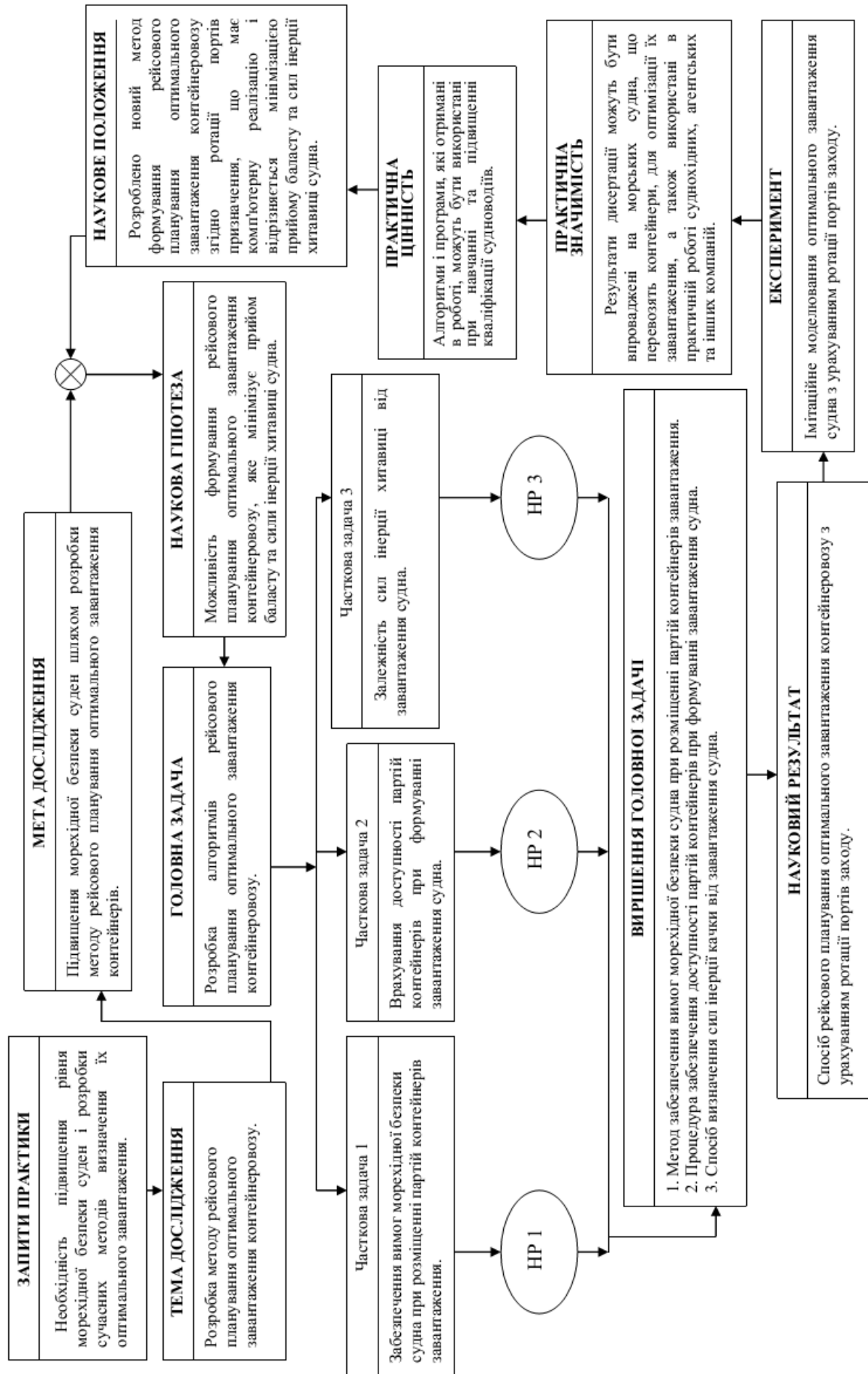


Рис. 2.1. Технологічна карта дисертації

Вирішення першої складової задачі дисертаційного дослідження передбачається в два етапи. На першому етапі формується план теоретичного розміщення ваги вантажу по вантажним приміщенням судна, який забезпечує допустимі значення показників посадки, остійності та міцності судна. На другому етапі слід розробити процедуру перетворення теоретичного розміщення ваги вантажу в реальне розміщення контейнерів по беям, ярусам і рядам з урахуванням ваги кожного контейнеру.

Друга складова задача дисертаційного дослідження потребує розробки процедури врахування доступності партій контейнерів при формуванні завантаження судна, яка передбачає можливість вивантаження партій контейнерів в портах їх призначення. Також передбачається постановка задачі оптимізації завантаження контейнеровозу з урахуванням послідовності портів заходу судна, причому на кожному переході між портами завантаження має відповідати оптимальним параметрам. В якості критерію оптимальності при формуванні оптимальної задачі завантаження контейнеровозу прийнято вагу баласту, а її обмеженнями являються вимоги щодо забезпечення морехідної безпеки судна і виникаючим силам інерції під час хитавиці, для формування яких потрібно використати аналітичний зв'язок параметрів остійності, посадки та міцності судна з величиною статичних моментів, що виникають під час його завантаження.

Формалізація третьої незалежної складової задачі потребує пошуку аналітичної залежності кутів крену та диференту від умов хитавиці судна, а також лінійних прискорень та сил інерції, що діють на контейнер. В подальшому слід використовувати формули для подовженої та поперечної складових сили інерції, а також вектору її горизонтальної складової. Також необхідно визначити залежність сил інерції хитавиці від осьового моменту інерції судна.

Також потрібно розробити спосіб мінімізації сил інерції хитавиці за рахунок розташування контейнерів у вантажному приміщенні. З такою метою потрібно розробити процедуру визначення моменту інерції судна відносно

його поздовжньої вісі в залежності від схеми укладання контейнерів у вантажних приміщеннях судна. Використовуючи залежність максимального значення горизонтальної складової сили інерції, яка виникає під час хитавиці, від моменту інерції судна відносно його поздовжньої вісі та частоти власних коливань судна, за допомогою комп'ютерної програми слід визначити контейнер, на який впливає максимальна сила інерція, та розрахувати величину цієї сили.

В результаті рішення складових незалежних задач були отримані нові наукові результати, які на технологічній карті методологічного забезпечення дисертаційного дослідження позначені відповідно НР1, НР2 і НР3:

- метод забезпечення вимог морехідної безпеки судна під час розміщення партій контейнерів завантаження являється науковим результатом НР1 першої складової задачі;
- процедура забезпечення доступності партій контейнерів під час формуванні завантаження судна є науковим результатом НР2 другої складової задачі;
- науковий результат третьої складової задачі НР3 полягає в розробці способу визначення контейнера, на який діє максимальна сила інерції хитавиці, в залежності від завантаження судна.

За допомогою комп'ютерної програми потрібно провести імітаційне моделювання перевірки результатів дисертаційного дослідження щодо коректності розробленого способу формування оптимального завантаження судна партіями контейнерів з урахуванням ротації портів.

Наукова гіпотеза відносно можливості формування рейсового планування оптимального завантаження контейнеровозу, яке мінімізує прийом баласту та сили інерції хитавиці судна була підтверджена одержаними в дисертаційній роботі теоретичними результатами та імітаційним моделюванням.

Даному дисертаційному дослідженню притаманна практична значимість, яка полягає у можливості упровадження його результатів на судна, що

перевозять контейнери, для оптимізації їх завантаження, а також використані в практичній роботі суднохідних, агентських, кріюінгових та інших компаній.

Практична цінність результатів дисертаційної роботи полягає в тому, що одержані в роботі теоретичні результати і програми можуть бути застосовані для навчання і підвищення кваліфікації судноводіїв.

Одержані в дисертаційному дослідженні наукові результати і проведені імітаційне моделювання визначають його наукове положення, яке може бути сформульовано таким чином:

Розроблено новий метод 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.

2.3 Методика проведення дисертаційного дослідження

В даному підрозділі приведено стислий виклад методики проведення дисертаційного дослідження.

По-перше, методами дедукції необхідно провести огляд основних напрямків вирішення проблеми забезпечення безаварійності судноводіння, що обумовлює вибір теми дисертації.

Декомпозиція головної задачі дисертаційного дослідження на незалежні складові задачі методами дослідження операцій, та забезпечення методологічного обґрунтування дисертаційного дослідження являється наступним етапом виконання роботи.

Наступним етапом роботи полягає в пошуку аналітичної залежності кутів крену та диференту від умов хитавиці судна, а також лінійних прискорень та сил інерції, що діють на контейнер. Потім слід застосувати аналітичні вирази для поздовжньої та поперечної складових сили інерції, а також для розрахунку вектору її горизонтальної складової. Окремим

завданням є визначення залежності сил інерції хитавиці від осьового моменту інерції судна.

В подальшому для вирішення задач дисертаційного дослідження слід розробити процедури врахування доступності партій контейнерів під час формування завантаження судна, чим передбачається можливість вивантаження партій контейнерів в портах їх призначення. Також слід здійснити постановку задачі оптимізації завантаження контейнеровозу з урахуванням послідовності портів заходу судна, причому на кожному переході між портами завантаження має відповідати оптимальним параметрам. Також слід формалізувати обмеження задачі оптимізації, якими являються вимоги по забезпеченню морехідної безпеки судна і виникаючим силам інерції під час хитавиці, для формування яких потрібно використати аналітичний зв'язок параметрів остійності, посадки та міцності судна з величиною статичних моментів, що виникають під час його завантаження.

Наступним етапом дослідження є розробка процедури забезпечення вимог морехідної безпеки судна під час розміщення партій контейнерів завантаження, яка пов'язана із плануванням розміщення контейнерів з урахуванням їх ваги по беям, ярусам і рядам, що забезпечує величину виникаючих статичних моментів, вигинальних моментів та перерізуючих сил, що задовольняють вимогам морехідної безпеки судна.

В подальшому слід розглянути спосіб формування плану теоретичного розміщення ваги вантажу по вантажним приміщенням судна, що забезпечує допустимі значення показників посадки, остійності та міцності судна. Також слід розробити процедуру перетворення теоретичного розміщення ваги вантажу в реальне розміщення контейнерів по беям, ярусам і рядам з урахуванням ваги кожного контейнеру.

Надалі потрібно розробити спосіб мінімізації сил інерції хитавиці за рахунок розташування контейнерів у вантажному приміщенні, для чого слід розглянути процедуру визначення моменту інерції судна відносно його

поздовжньої вісі в залежності від схеми укладання контейнерів у вантажних приміщеннях судна.

2.4 Висновки за другим розділом

Другий розділ дисертаційної роботи присвячено вибору теми дисертаційного дослідження і його основним напрямкам, в якому представлено технологічну карту дослідження, що відображає його методологічну структуру, та приведено його методологічне забезпечення.

В технологічній карті приведено мету дослідження і його головну задачу, що представлена трьома складовими задачами. Сформульовано робочу гіпотезу наукового дисертаційного дослідження, також показано, що отримано наукові результати дисертаційного дослідження, яким притаманна наукова новизна.

У другому розділі також вказано на практичну цінність і значимість проведеного дисертаційного дослідження, що підтверджено можливістю застосування практичних результатів, одержаних в дисертаційній роботі. В розділі приведено формулювання основного наукового положення роботи.

В заключному підрозділі представлено стислу методику вирішення незалежних складових задач дисертаційного дослідження, отриманих в дисертаційній роботі, яка висвітлює послідовні кроки наукового дослідження згідно теми дисертації.

Методика вказує на застосування сучасних методів теоретичного аналізу, використання адекватних математичних моделей процесів, що досліджуються, та проведення імітаційного комп'ютерного моделювання для підтвердження коректності одержаних теоретичних результатів дисертаційного дослідження, а також запропонованого нового методу визначення оптимального послідовного завантаження контейнеровозів згідно ротації портів призначення з урахуванням сил інерції, що виникають під час хитавиці судна.

РОЗДІЛ 3. ФОРМУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВАНТАЖНОГО ПЛАНУ КОНТЕЙНЕРОВОЗУ

У цьому розділі розглянуто матеріали і методи, необхідні для формалізації головного завдання дисертаційного дослідження та її рішення.

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 хитавиці, повинні бути в допустимих межах.

3.1 Формальний опис обмежень згідно з морським станом судна

Аналітичні вирази обмежень згідно морського стану судна, тобто відповідності вимогам посадки, остійності та загальної поздовжньої міцності судна детально розглянуті в роботах [43, 76], причому під стратегією завантаження судна мається на увазі розміщення партій прийнятого вантажу по вантажним приміщенням судна, розміщення баласту і запасів в танках.

Наведемо основні відомості щодо формалізації обмежень щодо морехідного стану судна, які будуть використані далі при виборі оптимальної стратегії завантаження судна.

У згаданих роботах [43, 76] показано, що спочатку слід провести розрахунок граничних значень статичних моментів M_x^* , M_y^* та M_z^* , які задовольняють вимогам обмежень щодо морехідного стану судна. Потім формується множина допустимих стратегій завантаження, відносно яких статичні моменти судна M_x , M_y та M_z не перевищують отриманих граничних

величин статичних моментів M_x^* , M_y^* и M_z^* , враховуючи, щоб водотоннажність судна знаходилась в допустимих межах і обсяг вантажу не перевищував вантажомісткість судна.

Обмеження за середньою осадкою судна $T_{срд}$, яка лімітується вантажною маркою, дозволяє за гідростатичними таблицями визначити верхню межу водотоннажності судна D^* . Значення нижньої межі водотоннажності судна D_* визначається обмеженнями виробничих параметрів (судно порожнє і т.п.).

Таким чином, водотоннажність судна D може приймати значення укладені в інтервалі між D_* и D^* , тобто справедливе співвідношення:

$$D \in [D_*, D^*].$$

З огляду на те, що при завантаженні судна його водотоннажність D завжди перевершує нижню межу D_* , і, віднімаючи від верхньої межі D^* вагу судна порожнього, можна записати обмеження по вантажопідйомності судна:

$$\sum_i W_{pi} \leq W_v,$$

де $\sum_i W_{pi}$ – вага всього прийнятого вантажу, баласту та запасів;

W_v – вантажопідйомність судна, яка лімітована вантажною маркою.

Розглянемо граничні значення моментів M_x^* , M_y^* и M_z^* , що задовольняють обмеженням за морським станом судна.

Граничні значення статичного моменту M_x^* визначаються допустимими межами диференту d і вимогами загальної поздовжньої міцності судна.

Так як граничними величинами диференту є 0 і максимальне значення d_d , то, скориставшись співвідношенням з [5], отримаємо для нульового диференту:

$$D(x_g - x_c)/\bar{M} = 0,$$

де x_c – абсциса центру величини, яка відповідає водотоннажності D .

Очевидно, в цьому випадку:

$$x_g = x_c.$$

Засновуючись на останній рівності для нижньої межі $M_{x(d)}^*$ статичного моменту M_x щодо обмеження за диферентом можна записати:

$$M_{x(d)}^* = Dx_c.$$

Таким саме чином проводиться розрахунок верхньої межі $M_{x(d)}^*$ моменту M_x по обмеженню диференту:

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

де $\bar{M}$ – момент, диферентуючий судно на один сантиметр;

d_d – гранично-допустимий диферент.

Граничне значення статичного моменту M_{x^*} також залежить від вимог до загальної поздовжньої міцності судна.

В роботі [5] показано, що розрахунок міцності корпусу судна вимагає врахування сили тяжіння і сили підтримки, що діють на судно. Причому сили тяжіння, що діють на корпус, представлені у вигляді двох складових: одна з них постійна – сила тяжіння судна порожнього, і друга змінна – сила тяжіння від навантажень, що відповідають дедвейту.

Тому згинальні моменти і перерізуючі сили для кожного з перетинів корпусу судна виражаються у вигляді суми трьох доданків:

$$SF_i = SF_{\text{порі}} + SF_{\text{DWі}} + SF_{\text{спі}};$$

$$BM_i = BM_{\text{порі}} + BM_{\text{DWі}} + BM_{\text{спі}},$$

де $SF_{\text{пор}i}$ і $BM_{\text{пор}i}$ – складові відповідно перерізуючої сили і згинального моменту від сил ваги судна порожнього;

$SF_{\text{DW}i}$ і $BM_{\text{DW}i}$ – складові відповідно перерізуючої сили і згинального моменту від навантажень, що входять в дедвейт;

$SF_{\text{сп}i}$ і $BM_{\text{сп}i}$ – складові відповідно перерізуючої сили і згинального моменту від дії сил підтримки.

Значення гранично-допустимих згинальних моментів BM_{di} і перерізуючих сил SF_{di} для кожного i -го перетину корпусу судна наведені в інформації по міцності судна.

Враховуємо, що перерізуючі сили і згинальні моменти для кожного з передбачених перетинів мають постійну складову $SF_{\text{пор}i}$ і $BM_{\text{пор}i}$, значення яких для кожного перетину наведені в інформації по міцності судна. Тут є відомості щодо значень перерізуючої сили і згинального моменту від дії сил підтримки $SF_{\text{сп}i}$ і $BM_{\text{сп}i}$, які залежать від водотоннажності судна D і його диференту d .

Для спільного врахування обмежень величини моменту M_x^* по посадці судна і його поздовжньої міцності слід, вважаючи, що баласт відсутній, загальну вагу всього прийнятого вантажу $P_\Sigma = \sum_{i=1}^n W_{pi}$ розподілити по баям таким чином, щоб з урахуванням ваги судна порожнього і прийнятих запасів, виникаючий статичний момент $\overline{M}_x$ задовільнив вимогам відносно посадкисудна, тобто $\overline{M}_x \in [M_{x(d)^*}, M_{x(d)}^*]$.

Статичний момент $\overline{M}_x$ визначається очевидним співвідношенням:

$$\overline{M}_x = M_{x0} + M_{x3} + \sum_{i=1}^n W_{ci} X_{gi},$$

де M_{x0} – момент від ваги судна порожнього;

M_{x3} – момент від запасів;

W_{ci} – вага бею;

X_{gi} – абсциса центру ваги бея.

Якщо позначити через $\Delta \bar{M}_{xc} = \sum_{i=1}^n W_{ci} X_{gi}$ необхідний приріст статичного моменту від прийому контейнерів, то:

$$\Delta \bar{M}_{xc} = \bar{M}_X - M_{x0} - M_{x3},$$

причому допустимі значення $\Delta \bar{M}_{xc}$ укладені в межах $[\Delta \bar{M}_{xc}^*, \Delta \bar{M}_{xc}^*]$:

$$\Delta \bar{M}_{xc} \in [\Delta \bar{M}_{xc}^*, \Delta \bar{M}_{xc}^*],$$

де $\Delta \bar{M}_{xc}^* = \bar{M}_{X^*} - M_{x0} - M_{x3}$ та $\Delta \bar{M}_{xc}^* = \bar{M}_{xc}^* - M_{x0} - M_{x3}$.

Розміщення контейнерів по баям не дозволяє створити реальне збільшення ΔM_{xc} , яке рівне необхідному $\Delta \bar{M}_{xc}$, так як число контейнерів в кожному беї приблизно однакове. Тому слід розробити першу процедуру, призначену для формування послідовності ваг беїв $\{W_{ci}, X_{gi}\}$, що створюють реальний приріст ΔM_{xc} , який мінімально відрізняється від необхідного приросту $\Delta \bar{M}_{xc}$, тобто $|\Delta M_{xc} - \Delta \bar{M}_{xc}| = \min$. Ця перша процедура також повинна передбачати перевірку можливості створення необхідного приросту $\Delta \bar{M}_{xc}$ тільки вагою прийнятого вантажу. Якщо це неможливо, то з її допомогою визначається мінімальна кількість баласту і танки для його прийому.

З іншого боку, послідовності $\{W_{ci}, X_{gi}\}$ відповідають згинальні моменти BM_j та перерізуючі сили SF_j в кожному з j -х контрольних перерізів, допустимість яких визначається значеннями гранично-допустимих згинальних моментів BM_{dj} і перерізуючих сил SF_{dj} . Якщо у всіх перетинах згинальні моменти BM_j та перерізуючі сили знаходяться в допустимих межах, то послідовність ваг бейв $\{W_{ci}, X_{gi}\}$ задовольняє вимогам по посадці судна і його поздовжньої міцності і є допустимою. В іншому випадку послідовність $\{W_{ci}, X_{gi}\}$ – неприпустима.

Множина Mn_{wc} допустимих послідовностей $\{W_{ci}, X_{gi}\}$ формується наступним чином. Для кожного із значень $\Delta \bar{M}_{xc} \in [\Delta \bar{M}_{xc}^*, \Delta \bar{M}_{xc}^*]$ в першу чергу формується послідовність ваги бейв $\{W_{ci}, X_{gi}\}_k$, яка задовольняє вимогам посадки судна. За допомогою другої процедури за відомим алгоритмом послідовність $\{W_{ci}, X_{gi}\}_k$ перевіряється за обмеженням поздовжньої міцності, і в разі позитивного результату перевірки $\{W_{ci}, X_{gi}\}_k$ враховується множина Mn_{wc} . Якщо по завершенню формування множина Mn_{wc} виявиться порожньою, то необхідний прийом баласту, який не змінить величину необхідного приросту $\Delta \bar{M}_{xc}$, але дозволить привести в допустимі межі значення згинальних моментів BM_j та перерізуючих сил SF_j .

Величина статичного моменту M_z впливає на остійність судна. Тому його допустимі граничні значення визначаються обмеженнями за остійністю. Розглянемо обмеження, які забезпечують необхідну остійність судна. Обмеження, в першу чергу, накладаються на початкову метacentричну висоту h , тобто $h_{dmin} \leq h \leq h_{dmax}$, де h_{dmin} та h_{dmax} – відповідно нижня і верхня межі

початкової метацентричної висоти h , причому величина h_{dmin} визначається вимогами ІМО і Регістру судноплавства, а значення h_{dmax} – величиною критерію прискорення.

У загальному випадку величина початкової метацентричної висоти знаходиться з виразу:

$$h = z_m - z_g + \Delta h,$$

де z_m та z_g – аплікати відповідно метацентра і центру тяжіння, що залежать від водотоннажності D ;

Δh – поправка метацентричної висоти на вільні поверхні.

Помноживши обидві частини рівняння на водотоннажність D , отримаємо:

$$M_z = D(z_m + \Delta h - h).$$

Очевидно, верхня межа M_{Zh}^* моменту M_z за метацентричною висотою має вигляд:

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

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

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

Отриманні значення нижньої M_{Zh}^* та верхньої M_{Zh}^* меж моменту M_z є функціями водотоннажності D і характеризують обмеження щодо початкової метацентричної висоти.

Критерії остійності $M_{\text{опр}}$, l_{max} , θ_{max} та $\theta_{\text{зак}}$ можна знайти за допомогою діаграм статичної остійності і є функціями водотоннажності D і статичного моменту M_z . Оскільки вказані змінні обмежені для забезпечення остійності судна величинами $M_{\text{кр}}$, l_{maxd} , θ_{maxd} і $\theta_{\text{закd}}$, то можна знайти межу статичного моменту M_z за обмеженнями зазначених змінних. Граничні значення моменту M_z за наведеними параметрами наступні:

$M_{\text{зор}}^*$ – межа моменту M_z , що враховує обмеження на величину перекидаючого моменту $M_{\text{опр}}$;

$M_{\text{zm}\theta}^*$ – межа моменту M_z , відповідна граничному значенню кута крену θ_{max} , при якому досягається максимальне плече l_{max} ;

M_{zl}^* – межа моменту M_z , яка враховує обмеження на величину максимального плеча l_{max} ;

$M_{\text{z}\theta}^*$ – граничне значення моменту M_z , відповідне обмеженням на величину кута заходу діаграми статичної остійності.

Верхня межа початкової метацентричної висоти h_{dmax} визначається вимогами відносно критерію прискорення:

$$h_{\text{dmax}} = f(\theta_r, B, K_{yd}),$$

де θ_r – розрахункова амплітуда бортової хитавиці;

B – ширина судна;

K_{yd} – допустиме значення критерію прискорення.

Отримане значення h_{dmax} визначає нижню межу M_{Zh}^* статичного моменту M_z , а всі інші межі лімітують верхнє граничне значення M_z . Тому, якщо позначити загальні верхню M_z^* та нижню M_{z*} межі моменту M_z , то справедливі такі співвідношення:

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

$$M_Z^* = \min(M_{Zh}^*, M_{zop}^*, M_{zm0}^*, M_{zl}^*, M_{z30}^*), \quad D \in [D_*, D^*].$$

Таким чином, завантаження судна контейнерами, тобто їх розміщення по беях, ярусах і рядах повинно відповідати таким обмеженням:

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

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

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

де n і m – відповідно число беїв і використаних баластних танків;

W_{bi}, X_{bi}, Y_{bi} и Z_{bi} – відповідно вага баласту в i -м танку і координати його сили тяжіння;

X_{gi}, Y_{gi} и Z_{gi} – координати сили тяжіння завантажених беїв;

$$\Delta \bar{M}_{zc}^* = M_{Z^*} - M_{z0} - M_{z3}, \quad \Delta \bar{M}_{zc}^* = M_Z^* - M_{z0} - M_{z3}.$$

3.2 Формування задачі оптимізації завантаження контейнеровозу

Критерієм оптимальності в даному оптимізаційному завданні доцільно обрати кількість прийнятого баласту під час формування завантаження контейнерів з урахуванням вимог морехідної безпеки, який повинен бути мінімізований. Більш того, сили інерції, що виникають під час хитавиці і діючі на контейнери повинні знаходитися в допустимих межах, а якщо можливо мати мінімальні значення. Оптимізаційна задача повинна бути

сформована з урахуванням всіх обмежень на завантаження, як це передбачено методами математичного програмування [131].

Скористаємося раніше отриманими аналітичними виразами для обмежень і запишемо оптимізаційні задачі завантаження судна, враховуючи результати першого підрозділу цього розділу, в якому вказувалося, що обмеженням морехідної безпеки і допустимості сил інерції під час хитавиці повинні задовольняти кожне з завантажень при виході судна на черговий перехід. Тому і оптимізація завантажень проводиться для кожного з переходів судна, включно до останнього порту призначення.

В якості критерію оптимальності обираємо, як раніше вказувалося, кількість прийнятого баласту під час завантаження контейнерів для останнього порту. Отже, критерій оптимальності $K = W_b$, а сама оптимізаційна задача 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 $F_{\max}$ та F_d – відповідно найбільша з сил інерції, що діє на кожен з контейнерів завантаження, і допустиме значення сили інерції.

Для вирішення даної оптимізаційної задачі спочатку необхідно сформувати множину Mn_B допустимих завантажень $G_{c(N-1)}$, які відповідають обмеженням морехідної безпеки, а потім з отриманої множини виділити підмножину Mn_F , яке задовольняє останньому обмеженню по виникаючій силі інерції, причому $Mn_F \subset Mn_B$. І, нарешті, з підмножини

Mn_F вибирається оптимальне завантаження $G_{c(N-1)}^0$, при якому критерій оптимальності приймає мінімальне значення.

При більш детальному аналізі оптимізаційної задачі виявляється, що можливе існування підмножини завантажень Mn_B^c , коли обмеження оптимізаційної задачі досягаються під час розміщення контейнерів без прийому баласту. Отже, прийнятий критерій оптимальності втрачає сенс, а в якості критерію оптимальності можна запропонувати максимальну силу інерції F_{max} , що діє на контейнери під час хитавиці судна, яку слід мінімізувати.

Визначенню множини Mn_B допустимих завантажень $G_{c(N-1)}$, які відповідають обмеженням щодо морехідної безпеки присвячені роботи [88, 89]. Під час завантаження 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 хитавиці, повинні бути в допустимих межах.

Більш докладний розгляд цього питання дозволяє запропонувати наступну формалізацію завантаження судна. У першому наближенні під завантаженням судна G будемо розуміти множину партій вантажу p_i , що знаходяться на судні, судові запаси P_z , баласт P_b і їх розміщення на судні Q . Через $\tilde{p}_i$ позначимо партію вантажу, до якої є вільний доступ для вивантаження, тому формальний запис завантаження судна G , як сукупності навантажень від вантажних партій, баласту, судових запасів і їх розміщення на судні:

$$G = \{\cup p_i, P_b, P_z, Q\}.$$

Початкове завантаження судна в порту відправлення $G_o = \{\tilde{p}_1 \cup p_i, P_b, P_z, Q_o\}$ повинне забезпечити доступність до вантажів, які вивантажують в першому порту розвантаження, забезпечити допустимий морехідний стан $M_o \in Mn_{sf}$, де Mn_{sf} – множина безпечних морехідних станів, а значення сил інерції качки F_{jk} , що діють на вантаж, повинні знаходитись в допустимих межах, тобто $F_{jko} < F_{jd}$. Доцільно розрізняти розміщення вантажу Q_c і баласту Q_b . Тому початкове завантаження судна:

$$G_o = \{\tilde{p}_1 \cup p_i, Q_{co}, P_z, P_{bo}, Q_{bo}\} \text{ або}$$

$$G_o = \{G_{co}, P_{bo}, Q_{bo}\},$$

де $G_{co} = \{\tilde{p}_1 \cup p_i, Q_{co}, P_z\}$ – розміщення вантажу на судні, де значення P_z

залишається незмінним.

Після вивантаження в першому порті, те, що залишилося завантажити на судно, позначається $G_1 = \{\tilde{p}_2 \cup p_i, Q_{c1}, P_z, P_{b1}, Q_{b1}\}$ або $G_1 = \{G_{c1}, P_{b1}, Q_{b1}\}$.

Після вивантаження в попередніх портах завантаження судна після того, як вантаж був зданий в s -му порті формально виражається наступним чином:

$$G_s = \{G_{cs}, P_{bs}, Q_{bs}\},$$

причому $G_{cs} = \{\tilde{p}_{s+1} \cup p_i, Q_{cs}, P_z\}$.

Отже, кожне з завантажень судна G_s перед виходом до чергового порту призначення повинне забезпечити вільний доступ до вантажу, призначеному для вивантаження в наступному порті, а також мати кваліфікацію морехідної безпеки $M_s \in Mn_{sf}$, як і допустимість сил інерції під час хитаючи $F_{jks} < F_{jd}$, на майбутній перехід, що формально можна виразити таким чином:

$$G_s = \{G_{cs}, P_{bs}, Q_{bs}\},$$

$$G_{cs} = \{\tilde{p}_{s+1} \cup_{i \neq 1, 2, \dots, s} p_i, Q_{cs}, P_z\}, \quad (s=0 \dots n-1)$$

$$M_s \in Mn_{sf},$$

$$F_{jks} < F_{jd},$$

де n – число портів вивантаження.

Для формування послідовності завантажень судна G_s , які відповідають перерахованим вимогам, слід врахувати, що розміщення вантажу Q_{cs} в кожному завантаженні судна включено в попереднє $Q_{c(s-1)}$. Отже, початкове розміщення вантажу Q_{c0} містить всі наступні розміщення Q_{cs} і справедливі співвідношення:

$$G_{cs} \subset G_{c0}, \quad (s=0 \dots n-1)$$

$$\bigcup_{s=1}^{n-1} G_{cs} = G_{c0}.$$

Тому 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 останньому порті завантаження.

Під час вирішення поставленого завдання слід враховувати зв'язок між завантаженням судна і параметрами його хитавиці, які визначають характеристики виникаючих кутових прискорень і впливають на величину сил інерції.

В роботі [92] показано, що максимальне значення горизонтальної складової сил інерції $\max F_{H1}$ під час хитавиці судна, що діє на контейнер визначається наступним виразом:

$$\begin{aligned} \max F_{H1} = m_c \omega_k^2 \{ & [\Delta Z \beta_m \sin(\omega_k t - \psi_\beta) - (\frac{g}{2} + 0,5h_w \sin \omega_k t) \cos \theta \sin \beta]^2 + \\ & + [\Delta Z \theta_m \sin(\omega_k t - \psi) + (\frac{g}{2} + 0,5h_w \sin \omega_k t) \sin \theta]^2 \}^{1/2}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

де β_m – амплітудне значення кута диференту β ;

ψ_β – початкова фаза поздовжніх коливань.

θ_m – амплітудне значення кута крену;

ψ – початкова фаза;

ω_k – удавана частота коливань;

m_c – маса вантажу, ΔZ – відстань між центрами мас вантажів та судна по висоті.

Аналіз наведеного виразу (3.1) показує, що на значення $\max F_{H1}$ найбільший вплив мають розміщення контейнеру (ΔZ) і кутові прискорення бортової хитавиці, які визначаються величиною θ_m :

$$\theta_m = \frac{\chi_\theta \omega_o^2}{[(\omega_o^2 - \omega_k^2)^2 + 4h^2 \omega_k^2]^{1/2}}, \quad (3.2)$$

де ω_k – удавана частота коливань;

ω_o – власна частота судна, причому

$$\omega_o^2 = \frac{Dh_o}{(J_x + m_x)}, \quad (3.3)$$

h_o – поперечна початкова метацентрична висота.

Мінімізувати величину $\max F_{H1}$ до необхідних допустимих значень можна, крім розміщення контейнеру, ще й зменшенням амплітудного значення кута крену θ_m , для чого, як випливає з (3.2), необхідно домогтися максимальної різниці між частотами ω_0 і ω_k . Якщо ω_k є некерованою змінною і її величину можна тільки прогнозувати на майбутній перехід, то величина ω_0 залежить від завантаження судна, що випливає з виразу (3.3).

Саме завантаження судна визначає величину поперечної початкової метацентричної висоти h_0 і моменту інерції судна J_x відносно поздовжньої вісі X-X. Якщо з множини допустимих завантажень обрати ту, для якої $(\omega_0 - \omega_k)$ має максимальне значення, то за інших рівних умов можна забезпечити виконання вимоги допустимих значень сил інерції під час хитаєвості судна.

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

Вантажне приміщення складається із потенційних контейнерних місць, причому положення центра 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 позначимо 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 відносно посадки, остійності і міцності судна. Припускаємо, що сумарна вага контейнерів не

перевищує вантажопідйомності, а їх кількість $N_{\Sigma c}$ дорівнює числу потенційних контейнерних місць вантажного приміщення $N_{\Sigma b}$, тобто.

$$N_{\Sigma c} = N_{\Sigma b}.$$

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.

Так як першим формується завантаження для множини контейнерів останнього N_p -го порту, то розглядаємо множину контейнерів Mn_{Np} з масами m_{Npj} .

Партія, що завантажувється, розташовується в центральному трюмі судна, через який проходить мідель-шпангоут. Розглянемо дві системи координат: одна, пов'язана з судном – стандартна, а друга – система координат, пов'язана з вантажним приміщенням, початок якої визначається в судновій системі координат. Для розглянутого випадку система координат трюму збігається з судновою системою координат. Структура трюму характеризується впорядкованими потенційними контейнерними місцями в тривимірному просторі, причому розміри потенційного контейнерного місця рівні розмірам контейнеру 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, як впливає з рисунку 3.1:

$$x_i = X_0 + \frac{2i-1}{2} \Delta x,$$

$$y_j = Y_0 + \frac{2j-1}{2} \Delta y,$$

$$z_k = Z_o + \frac{2k-1}{2} \Delta z.$$

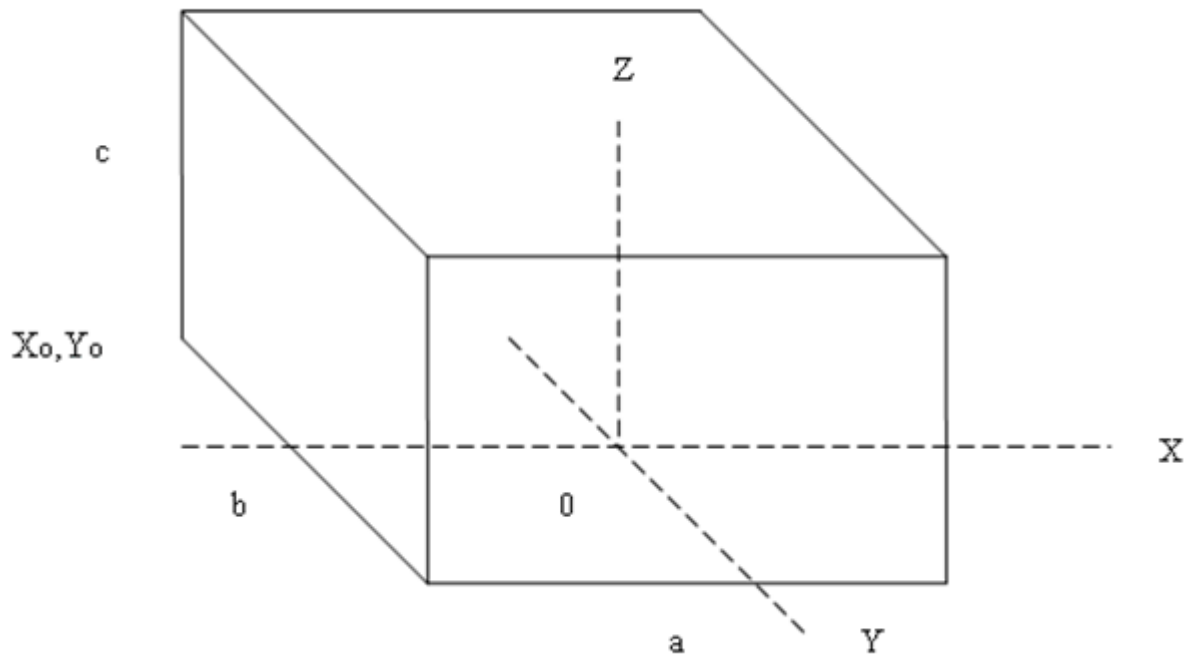


Рисунок 3.1 – Система координат вантажного приміщення

Враховуємо, що $X_o = -\frac{a}{2} \Delta x$, $Y_o = -\frac{b}{2} \Delta y$ и $Z_o = 0$:

$$x_i = \left(\frac{2i-1}{2} - \frac{a}{2} \right) \Delta x,$$

$$y_j = \left(\frac{2j-1}{2} - \frac{b}{2} \right) \Delta y,$$

$$z_k = \frac{2k-1}{2} \Delta z.$$

Число контейнерів і число потенційних контейнерних місць трюму рівні abc . 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:

$$\Delta M_x = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c gm_{ijk} x_i ;$$

$$\Delta M_y = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c gm_{ijk} y_i ;$$

$$\Delta M_z = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c gm_{ijk} z_i .$$

З урахуванням раніше отриманих виразів для x_i , y_j та z_k :

$$\begin{aligned} \Delta M_x &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c gm_{ijk} \left(\frac{2i-1}{2} - \frac{a}{2} \right) \Delta x ; \\ \Delta M_y &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c gm_{ijk} \left(\frac{2j-1}{2} - \frac{b}{2} \right) \Delta y \\ \Delta M_z &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c gm_{ijk} \left(\frac{2k-1}{2} \right) \Delta z . \end{aligned} \quad (3.4)$$

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

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

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

У рівняннях (3.4) вакантні маси m_{ijk} в тензорі завантаження необхідно замістити масами m_{Nps} контейнерів множини Mn_{Np} таким чином, щоб різниця між правою і лівою частинами кожного з рівнянь була мінімальна.

Перш за все, необхідно перевірити, чи можливо забезпечити приріст моменту ΔM_d вагою контейнерів множини Mn_{Np} . У разі позитивного результату перевірки, формування тензору завантаження проводиться наступним чином.

Першим етапом формування тензору завантаження є розподіл контейнерів по беям трюму, виходячи із наступних міркувань. Сумарну вагу P_Σ завантажених контейнерів множини Mn_{Np} розділимо на число беїв і отримаємо середню вагу контейнерів бея $P_{cp} = P_\Sigma / a$.

Для створення необхідного диференту, який забезпечується збільшенням моменту ΔM_d , необхідно змінити середню вагу бею P_{cp} на величину, кратну деякій вазі ΔP .

В результаті проведеного дослідження розподіл ваги P_Σ всіх контейнерів, що завантажуються, по беям має здійснюватися згідно залежностям:

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

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

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

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

Для дотримання зазначених умов множину контейнерів Mn_{Np} слід розділити на a підмножин Mn_a з однаковим числом контейнерів n_a , з огляду

на те, що вага контейнерів кожної підмножини Mn_a (бею) повинна бути максимально близькою до P_i .

Для вирішення зазначеного завдання пропонується наступна процедура. Перш за все, здійснюється ранжування контейнерів в послідовності убавання їх ваги, тобто елементи множини Mn_{Np} упорядковуються за ознакою ваги. Множина Mn_{Np} представляється послідовністю ваги контейнерів $P_{ci} \succ$, причому $P_{ci} \geq P_{ci+1}$, 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 розглядаємо як множини Mn_{Np} .

Формування першого бею з максимальною вагою P_1 проводиться за допомогою раніше отриманої 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 Sr_1 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

$$P_{ci}^1 \succ = \{P_{c1} \geq P_{c2} \geq \dots \geq P_{cN_{n1}-1} \geq P_{cN_{k1}+1} \dots \geq P_{cd-1} \geq P_{cd}\}.$$

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.

Для формування наступних беїв (підмножин Sr_i) продовжуємо реалізацію процедури, що складається з двох етапів. По-перше, модифікуємо попередню послідовність $P_{ci}^{k-1} \succ$, виключаючи з неї виділений фрагмент $\{Pk_{ci}^{k-1}\}_k \succ$, і отримаємо чергову модифіковану послідовність $P_{ci}^k \succ$, яка на n_a контейнерів коротше попередньої. Другим етапом є виділення з послідовності $P_{ci}^k \succ$ фрагменту $\{Pk_{ci}^k\}_{k+1} \succ$, що містить n_a послідовних контейнерів, сумарна вага $\tilde{P}_{k+1}$ яких мінімально відрізняється від розрахункового значення P_{k+1} . За таким алгоритмом формується $a-1$ бей. Остання модифікована послідовність $P_{ci}^{a-1} \succ$ що містить n_a останніх контейнерів, які і складають останній a -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_{Nr} 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 $\Delta M_h = \sum_{i=1}^{ai} \Delta M_{hi}$.

Розподіл контейнерів бею по ярусах проводимо, домагаючись формування приросту ΔM_{hi} . Для цього слід визначити необхідну

(теоретичну) вагу контейнерів k -го ярусу $\bar{P}_{y_k}^i$, враховуючи, що зі зміною ярусу вона також змінюється пропорційно збільшенню ваги ΔP_{hi} відносно середньої ваги ярусу в бей $P_{mi} = \frac{\tilde{P}_i}{c}$.

За допомогою першої процедури вага ярусу зменшується зі збільшенням його номеру (від низу до верху), тобто нижній ярус має найбільшу вагу, а верхній є найбільш легким. В цьому випадку, вважаючи, що вага середнього ярусу дорівнює P_{mi} , отримаємо:

$$\bar{P}_{y_k}^i = P_{mi} + (S_k - k)\Delta P_{hi},$$

де $S_k = \text{Trunc}(c/2) + 1$, при c – парному и $S_k = c/2$, при c – непарному.

Значення ΔP_{hi} визначається формулою:

$$\Delta P_{hi} = \frac{\Delta M_{hi} - P_{mi} \Delta z \sum_{k=1}^c (k - 0,5)}{\Delta z \sum_{k=1}^c (S_k - k)(k - 0,5)}.$$

Маючи в своєму розпорядженні теоретичну вагу кожного ярусу $\bar{P}_{y_k}^i$ i -го бею, необхідно підібрати на кожен ярус b контейнерів, сумарна вага яких $\hat{P}_{y_k}^i$ мінімально відрізняється від $\bar{P}_{y_k}^i$.

Потім контейнери підмножин $S_{p_{ik}}$ розміщуються по відділах поперечного ряду i -го бею k -го ярусу (рядок тензору) так, щоб ваги контейнерів ярусу P_{cik} створювали мінімальний момент M_{yik} :

$$M_{yik} = \sum_{j=1}^b P_{cik} \left(\frac{2j-1}{2} - \frac{b}{2} \right) \Delta y.$$

Причому мінімізація сумарного моменту M_y при розміщенні контейнерів підмножини Sp_{ik} проводиться шляхом врахування його значення, який накопичився при розміщенні контейнерів у всіх попередніх ярусах, включаючи вже сформовані беї.

У разі створення мінімального моменту інерції прийнятого вантажу J_{xc} відносно поздовжньої вісі $X-X$, розміщення контейнерів підмножини Sp_{ik} слід проводити так, щоб контейнери з великими масами знаходилися ближче до центру трюму, а розміщення контейнерів з меншими масами виконувалось ближче до бортів. 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.

Для перевірки коректності запропонованих процедур формування завантаження вантажного приміщення без прийому баласту була розроблена комп'ютерна програма, що дозволяє формувати вихідну множину контейнерів Mn_{Nr} і їх розміщення в вантажному приміщенні.

Як приклад було згенеровано множину контейнерів чисельністю 300 штук, загальною вагою 3000 тон, причому вага контейнеру знаходиться в межах від 3,4 до 16,5 т.

У прикладі прийняті наступні розміри контейнеру: довжина $\Delta x = 7$ м, ширина $\Delta y = 4$ м, $\Delta z = 3$ м. Вантажне приміщення характеризується $a=6$ беями, в кожному беї кількість ярусів дорівнює $c=5$, а число контейнерів в ярусі $b = 10$.

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

Колір контейнеру залежить від його ваги: при вазі до 5 т контейнери позначені коричневим кольором; при вазі $5 \div 10$ т – колір контейнерів зелений; синім кольором позначені контейнери вагою $10 \div 15$ т, а червоним

кольором – контейнери вагою $15 \div 20$ т. Звертаємо увагу на ту обставину, що в межах одного кольору зі збільшенням ваги колір контейнеру темніше.

Розподіл контейнерів в ярусі з метою створення мінімального близького до нуля моменту M_y проводиться за допомогою процедури формування мінімального моменту інерції прийнятого вантажу відносно поздовжньої вісі судна, що впливає з рисунку 3.2.

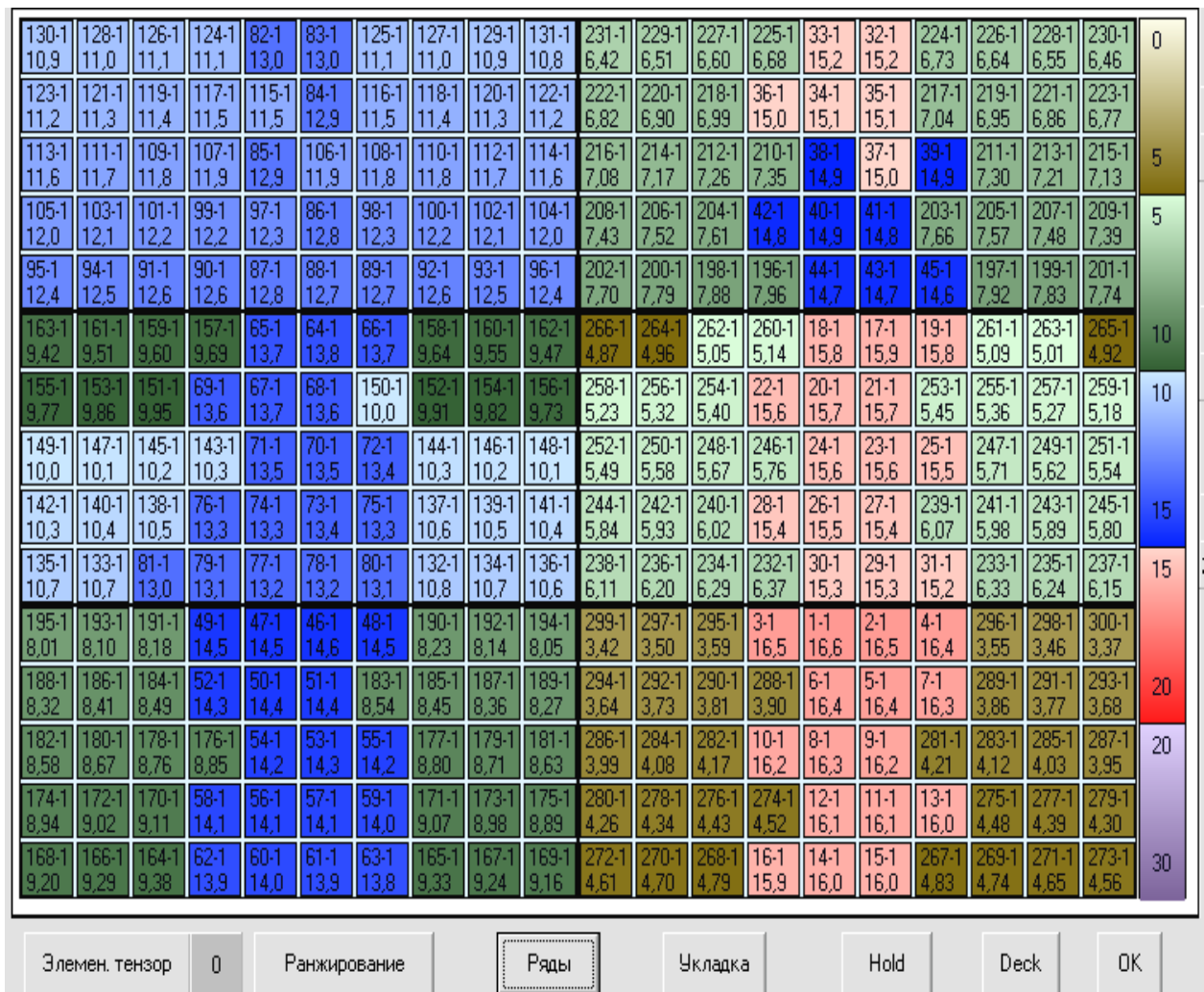


Рисунок 3.2 – Розміщення контейнерів в ярусах Sp_{ik}

З рисунку видно, що більш важкі контейнери ярусу розташовані ближче до центру трюму. Отриманий розподіл контейнерів по відділах вантажного приміщення являє собою допустимий тензор завантаження, що забезпечує

задані значення збільшень статичних моментів ΔM_d і ΔM_h , при яких виконуються вимоги щодо посадки, остійності судна і його загальної граничної міцності.

3.3 Оцінка максимальної величини горизонтальної сили інерції, що діє на вантаж під час хитавиці судна

Перевезення контейнерів, ліхтерів і генеральних вантажів, а також нестандартних габаритів, вимагає проводити їх кріплення з урахуванням ваги і діючої сили інерції. Величина сил інерції визначається лінійними прискореннями, що впливають на вантаж, які залежать від закономірностей зміни лінійних переміщень вантажу разом з палубою судна відносно опорної системи координат. Розглянуто види хитавиці судна, які породжують значні сили інерції, що впливають на вантаж, як показано в роботах [92, 129, 130].

Відомо, що для розрахунку сил інерції необхідно знати лінійні прискорення, що впливають на вантаж, які залежать від закономірностей зміни лінійних переміщень вантажу разом з палубою судна відносно опорної системи координат.

В роботі [6] показано, що для розрахунку лінійних прискорень в першому наближенні можна застосувати лінійні моделі бортової, кільової і вертикальної качки, використовуючи відповідні ізольовані рівняння. Як вказується в роботі [7], рівняння поперечної, поздовжньої і вертикальної хитавиці в ситуації пошуку сил інерції, що впливають на вантаж, можна розглядати незалежно. Причому визначальною є бортова хитавиця, що породжує домінуючі сили інерції. Тому спочатку наведемо рівняння бортової хитавиці, скориставшись диференціальним рівнянням, що описує кут крену θ судна, який наведено в роботі [6]:

$$(J_x + m_x)\ddot{\theta} + \mu_x \dot{\theta} + Dh_o \theta = \chi_\theta Dh_o \sin \omega_k t, \quad (3.5)$$

де J_x – момент інерції судна щодо поздовжньої вісі X-X;

m_x – узагальнені приєднані маси води відносно тієї ж вісі X-X;

μ_x – коефіцієнт демпфірування щодо вісі X-X;

D – водотоннажність судна (сила тяжіння);

h_o – поперечна початкова метацентрична висота;

χ_θ – редукційний коефіцієнт при бортовий хитавиці;

ω_k – уявна частота хвилювання.

Рівняння (3.1) записується у вигляді:

$$\ddot{\theta} + 2h\dot{\theta} + \omega_o^2\theta = \chi_\theta\omega_o^2\sin\omega_k t, \quad (3.6)$$

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

$\omega_o^2 = \frac{Dh_o}{(J_x + m_x)}$ – власна частота судна при бортовий хитавиці.

Рівняння (3.6) є лінійним неоднорідним диференціальним рівнянням з постійними коефіцієнтами, і його рішення є сумою приватного рішення θ_r і рішення відповідного однорідного рівняння. Так як амплітуда власних згасаючих коливань судна досить швидко наближається до нуля, то рівняння бортової хитавиці, як стаціонарний процес, згідно роботи [6], можна характеризувати тільки вимушеними коливаннями судна щодо вісі X-X під впливом регулярного хвилювання:

$$\theta = \theta_o \sin(\omega_k t - \psi), \quad (3.7)$$

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

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

У роботах [7, 6] показано, що в разі поздовжньої хитавиці судно здійснює вимушені коливання з частотою коливань хитавиці ω_k , так само як і при поперечній. Ізольоване рівняння поздовжньої хитавиці і його рішення за своєю структурою аналогічні поперечній хитавиці, тобто містить власні затухаючі коливання судна і вимушені гармонійні коливання з частотою хитавиці. Тому вираз для поточного значення кута диференту β також описується вимушеними гармонійними коливаннями з частотою хитавиці ω_k :

$$\beta = \beta_m \sin(\omega_k t - \psi_\beta), \quad (3.8)$$

де β_m – амплітудне значення кута диференту β ;

ψ_β – початкова фаза поздовжніх коливань.

Аналітичні вирази для β_m та ψ_β мають наступний вид:

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

де χ_β – редуційний коефіцієнт під час кильової хитавиці;

$\omega_{o\beta}$ – власна частота судна під час кильової хитавиці;

h_β – коефіцієнт згасання під час кильової хитавиці.

В роботі [7] вказується, що вертикальна поступальна хитавиця викликана орбітальним рухом судна, яке вважається круговим з радіусом, рівним половині висоти хвилі. Вертикальний поступальний рух ζ носить гармонійний характер з частотою коливань хитавиці ω_k та описується виразом:

$$\zeta = \zeta_0 \sin(\omega_k t), \quad (3.9)$$

де $\zeta_0 = 0,5h_w$ – амплітудне значення вертикального переміщення, причому h_w – висота хвилі.

Отримані вирази (3.7), (3.8) і (3.9) дозволяють розрахувати кутові прискорення спричинене хитавицею судна, а також лінійні прискорення і сили інерції, що впливають на вантаж.

Для розрахунку сил, що діють на вантаж в умовах судна, яке хитається, цілком достатньо враховувати його бортову, кільову і вертикальну хитавицю [7]. У цьому випадку на вантаж з масою M_c діють сили інерції F_θ , F_β і F_ζ відповідно від бортової, кільової і вертикальної хитавиці судна і сила тяжіння P_c . Розглянемо дві системи координат: опорну $OXYZ$ і суднову $OX_1Y_1Z_1$, причому суднова система координат $OX_1Y_1Z_1$ відхилена від опорної $OXYZ$ на кути крену θ та диференту β , як показано на рисунку 3.3.

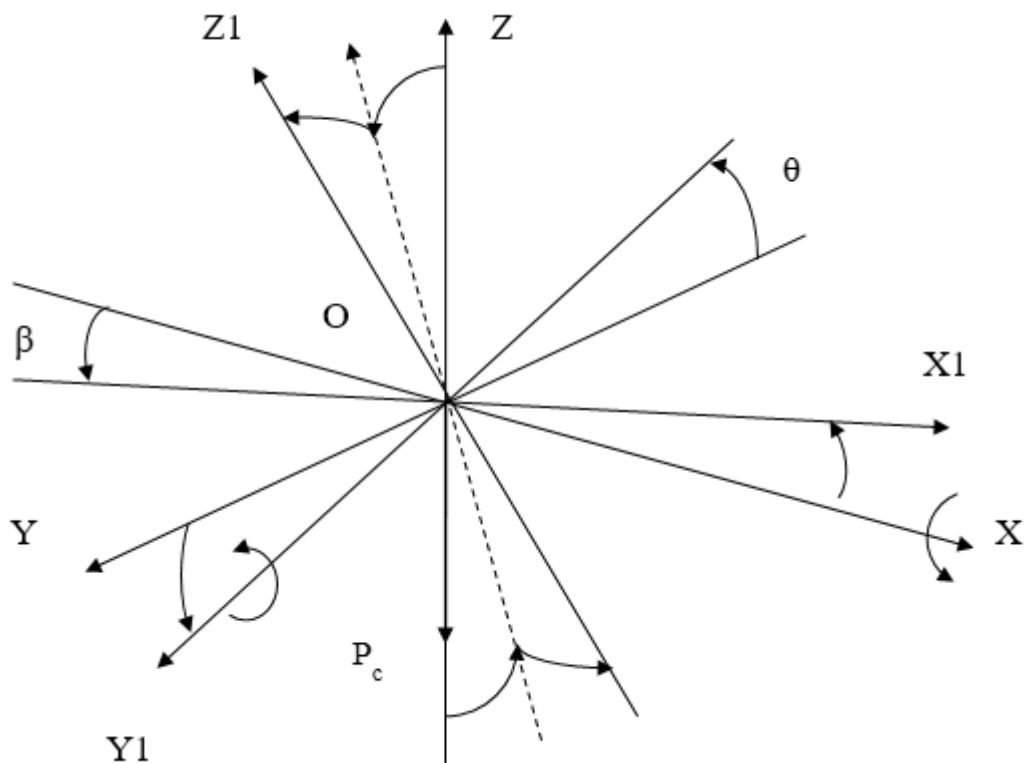


Рисунок 3.3 – Зв'язок систем координат $OXYZ$ та $OX_1Y_1Z_1$

Необхідно звернути увагу на ту обставину, що сила тяжіння P_c , як і сила інерції від вертикальної хитавиці F_ζ , зберігають незмінний напрямок в опорній системі координат OXYZ. Тому для пошуку проекцій сили тяжіння P_c і сил хитавиці на вісі суднової системи координат слід знайти матрицю напрямних косинусів M_1 , для чого спочатку необхідно знайти матрицю M_θ , що характеризує поворот на кут крену θ , матрицю M_β , відповідну повороту на кут диференту β , а потім зазначені матриці перемножити, тобто $M_1 = M_\theta M_\beta$.

Відхилення суднової системи координат OX₁Y₁Z₁ від опорної OXYZ проводиться на додатні кути θ і β , тобто з додатних напрямків осей X-X і Y₁-Y₁ повороти повинні передбачатися проти годинникової стрілки, як показано на рисунку 3.3. З рисунку 3.3 випливає, що матриця M_θ , повороту щодо вісі X-X характеризується наступним виразом:

$$M_\theta = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{vmatrix}.$$

Другий поворот на кут диференту β від кільової хитавиці описується матрицею M_β , яка має наступний вигляд:

$$M_\beta = \begin{vmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{vmatrix}.$$

Знаходимо добуток матриць M_θ та M_β :

$$M_1 = M_\theta M_\beta = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{vmatrix}, \text{ або}$$

$$M_1 = \begin{vmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ \sin \theta \sin \beta & \cos \theta & \sin \theta \cos \beta \\ \cos \theta \sin \beta & -\sin \theta & \cos \theta \cos \beta \end{vmatrix}.$$

Сила тяжіння P_c має негативний напрямок в опорній системі координат, а її проекції на вісі системи координат $OX_1Y_1Z_1$ визначаються направляючими косинусами останнього рядка матриці M_1 .

В результаті проведених аналітичних досліджень отримані вирази для поздовжньої F_{X1} та поперечної F_{Y1} складових сил інерції:

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

$$F_{Y1} = m_c \omega_k^2 [\Delta Z \theta_o \sin(\omega_k t - \psi) + (\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t) \sin \theta], \quad (3.10)$$

де $\beta = \beta_m \sin(\omega_k t - \psi_\beta)$, $\theta = \theta_m \sin(\omega_k t - \psi)$, в яких приведена амплітуда і початкова фаза визначаються отриманими раніше виразами, m_c – маса вантажу, ΔZ – відстань між центрами мас вантажу і судна по висоті.

Знайдемо максимальне значення суми горизонтальних проекцій F_{X1} та F_{Y1} , яку позначимо як F_{H1} . Очевидно:

$$F_{H1} = \sqrt{F_{X1}^2 + F_{Y1}^2}. \quad (3.11)$$

Для пошуку максимального значення F_{H1} необхідно знайти першу похідну за часом виразу (3.11), з якої визначається час t_H досягнення

максимуму F_{H1} , а потім – і сам максимум сумарної горизонтальної складової сил інерції $\max F_{H1}$, що діє на вантаж у процесі бортової та кільової хитавиці судна.

Очевидно, аналітичний вираз першої похідної горизонтальної складової сил інерції на качці F_{H1} має наступний вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial t} F_{H1} = F_{H1}^{-1} (F_{X1} \frac{\partial F_{X1}}{\partial t} + F_{Y1} \frac{\partial F_{Y1}}{\partial t}).$$

З урахуванням отриманого виразу для F_{X1} и F_{Y1} (3.10) знаходимо їх похідні $\frac{\partial F_{X1}}{\partial t}$ и $\frac{\partial F_{Y1}}{\partial t}$, тому рівняння для пошуку моментів часу t_H приймає наступний вигляд:

$$F_{X1} \frac{\partial F_{X1}}{\partial t} + F_{Y1} \frac{\partial F_{Y1}}{\partial t} = 0,$$

або з урахуванням підстановок виразів для сил F_{X1} , F_{Y1} та їх похідних:

$$\begin{aligned} & [q_\beta \sin(\omega_k t_H - \psi_\beta) - (q_g + 0,5h_w \sin \omega_k t_H) \cos \theta \sin \beta] \times \\ & \{q_\beta \cos(\omega_k t_H - \psi_\beta) - 0,5h_w \cos \omega_k t_H \cos \theta \sin \beta - \\ & - (q_g + 0,5h_w \sin \omega_k t_H) [\beta_m \cos \theta \cos \beta \cos(\omega_k t_H - \psi_\beta) - \theta_m \sin \beta \sin \theta \cos(\omega_k t_H - \psi)]\} + \\ & + [q_\theta \sin(\omega_k t_H - \psi) + (q_g + 0,5h_w \sin \omega_k t_H) \sin \theta] \times \\ & [q_\theta \cos(\omega_k t_H - \psi) + 0,5h_w \cos \omega_k t_H \sin \theta + \\ & + (q_g + 0,5h_w \sin \omega_k t_H) \theta_o \cos(\omega_k t_H - \psi) \cos \theta] = 0, \end{aligned}$$

$$\text{де } q_\beta = \Delta Z \beta_m, \quad q_\theta = \Delta Z \theta_m, \quad q_g = \frac{g}{\omega_k^2}.$$

Після виконання ряду нескладних аналітичних перетворень з останнього виразу отримаємо рівняння для розрахунку моменту часу t_H досягнення максимуму горизонтальної сили інерції F_{H1} методом простих ітерацій:

$$\begin{aligned}
 t_H = \frac{1}{\omega_k} \{ & \psi_\beta + \arcsin \{ \frac{1}{\Delta Z \beta_m} \{ (\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t_H) \cos \theta \sin \beta - \\
 & - \{ \Delta Z \beta_m \cos(\omega_k t_H - \psi_\beta) - 0,5h_w \cos \omega_k t_H \cos \theta \sin \beta - \\
 & - (\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t_H) [\beta_m \cos \theta \cos \beta \cos(\omega_k t_H - \psi_\beta) - \theta_m \sin \beta \sin \theta \cos(\omega_k t_H - \psi)] \} \}^{-1} \\
 & \times [\Delta Z \theta_m \sin(\omega_k t_H - \psi) + (\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t_H) \sin \theta] \times \\
 & [\Delta Z \theta_m \cos(\omega_k t_H - \psi) + 0,5h_w \cos \omega_k t_H \sin \theta + \\
 & + (\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t_H) \theta_m \cos(\omega_k t_H - \psi) \cos \theta] \} \} \}.
 \end{aligned}$$

Отже, максимальне значення горизонтальної складової $\max F_{H1}$ визначається наступним виразом:

$$\max F_{H1} = \sqrt{F_{X1}(t_H)^2 + F_{Y1}(t_H)^2}, \quad \text{або}$$

$$\begin{aligned}
 \max F_{H1} = m_c \omega_k^2 \{ & [\Delta Z \beta_m \sin(\omega_k t - \psi_\beta) - (\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t) \cos \theta \sin \beta]^2 + \\
 & + [\Delta Z \theta_m \sin(\omega_k t - \psi) + (\frac{g}{\omega_k^2} + 0,5h_w \sin \omega_k t) \sin \theta]^2 \}^{1/2}.
 \end{aligned}$$

В роботі [92] показано, що для розрахунку максимального значення горизонтальної складової $\max F_{H1}$ сил інерції була розроблена комп'ютерна програма, яка також моделює процес хитавиці судна і проводить оцінку поточних значень поздовжньої, поперечної та вертикальної складових сил інерції. На рисунку 3.4 наведено інтерфейс програми, з якого випливає, що

при заданих вихідних даних отримані наступні значення горизонтальних складових сил інерції $\max F_{X1} = 34 \text{ кН}$, $\max F_{Y1} = 286 \text{ кН}$ і $\max F_{H1} = 290 \text{ кН}$, а також розраховані поточні значення складових $F_{X1} = 20 \text{ кН}$, $F_{Y1} = -196 \text{ кН}$ та $F_{H1} = 196 \text{ кН}$.

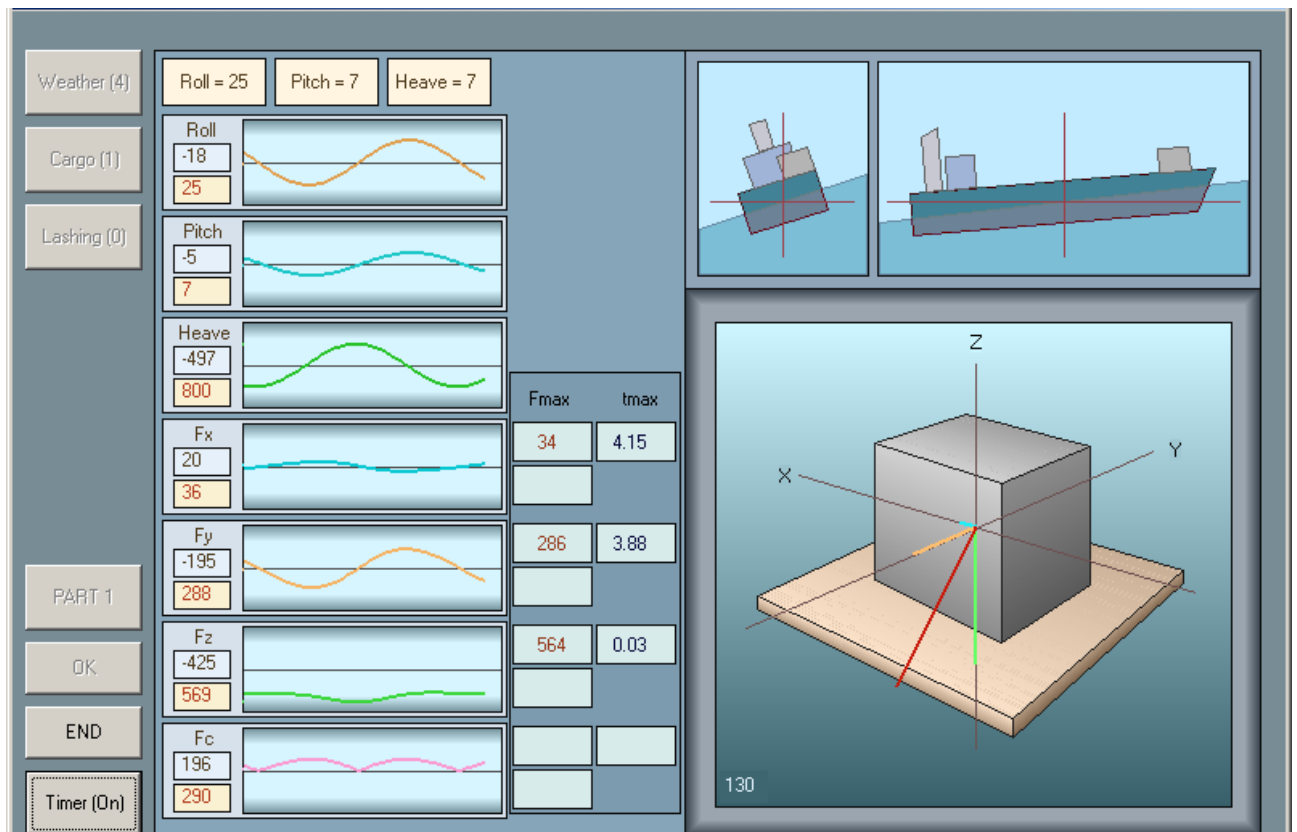


Рисунок 3.4 – Сили інерції, що діють на вантаж при хитавиці судна

3.4 Висновки за третім розділом

У третьому розділі наведені аналітичні вирази, що характеризують формалізацію обмежень згідно морського стану судна, які формалізують відповідності вимог відносно посадки, остійності та загальної поздовжньої міцності судна. Визначено граничні значення статичних моментів судна, які задовольняють вимогам за морським станом судна.

Отримано аналітичні вирази оцінки максимальної величини горизонтальної сили інерції, що діє на вантаж під час хитавиці судна. Для цього наведені формули розрахунку кутових і лінійних прискорень бортової, кильової і вертикальної качки судна.

Запропоновано спосіб формування оптимізаційної задачі завантаження контейнеровозу, в якості критерію оптимальності вибрано кількість прийнятого баласту, формалізованим обмеженням морехідної безпеки і діючим силам інерції хитавиці.

РОЗДІЛ 4. МЕТОД РЕЙСОВОГО ПЛАНУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ КОНТЕЙНЕРОВОЗУ З УРАХУВАННЯМ РОТАЦІЇ ПОРТІВ ЗАХОДУ

4.1 Формулювання завдання в загальному вигляді

Рейс містить N портів заходу судна, в яких відбувається прийом або здача вантажу, причому порти поділяються на три категорії: завантаження (1), вивантаження (2) і вивантаження з наступним завантаженням (3).

Послідовність портів заходу судна формально можна записати:

$$\text{Prt}_s^m = \text{Prt}_1^{m1}, \text{Prt}_2^{m2}, \dots, \text{Prt}_s^{ms}, \dots, \text{Prt}_N^{mN}, \quad (4.1)$$

де $s=1\dots N$, $m=m1\dots mN$, причому ms може приймати значення категорії порту 1, 2 або 3.

У портах прийому вантажу загальна вантажопідйомність і вантажомісткість судна після завантаження не перевищують допустимих значень. 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 порту завантаження може бути тільки одна партія вантажу, адресована для вивантаження в конкретному подальшому порту.

Партію вантажу позначимо $P_i^j(W_{pi}, N_{pi})$, де W_{pi} и N_{pi} – відповідно вага і кількість контейнерів партії; i – номер порту завантаження; j – номер порту вивантаження, причому $i < N$ і $j > 1$. Звертаємо увагу, що значення індексів і партій вантажу $P_i^j(W_{pi}, N_{pi})$ відповідають індексам s послідовності портів заходу Prt_s^m , у яких m приймає значення 1 або 3. В свою чергу,

значення індексів j партій вантажу $P_i^j(W_{pi}, N_{pi})$ відповідають індексам s послідовності Prt_s^m , у яких m дорівнює 2 або 3.

Таким чином, вихідними даними є послідовність портів заходу Prt_s^m , множина партій вантажу $P_i^j(W_{pi}, N_{pi})$, перевезення яких передбачене між портами, і характеристики судна, що здійснює перевезення вантажів.

На першому етапі необхідно визначити можливість перевезення заданих партій між зазначеними портами, з огляду на послідовність вантажних операцій і доступність до партій в портах вивантаження. Другий етап передбачає розміщення партій вантажу по вантажним приміщенням, яке задовольняє вимогам морехідної безпеки і формує множину допустимих завантажень судна. На третьому етапі проводиться вибір оптимального варіанту завантаження судна за обраним критерієм.

Спільний облік послідовності портів заходу судна та вантажні операції з відповідними партіями контейнерів, використовуючи (4.1), можна формалізувати наступним чином:

$$Prt_s^m = Prt_1^{m1}(\frac{\bar{P}_1}{\tilde{P}_1}), Prt_2^{m2}(\frac{\bar{P}_2}{\tilde{P}_2}), \dots, Prt_s^{ms}(\frac{\bar{P}_s}{\tilde{P}_s}), \dots, Prt_N^{mN}(\frac{\bar{P}_N}{\tilde{P}_N}),$$

де $\bar{P}_s$ и $\tilde{P}_s$ – множина партій контейнерів відповідно завантажених та вивантажених в s -му порті, причому у випадку $ms = 1$ $\tilde{P}_s = \emptyset$, як і при $ms = 2$ $\bar{P}_s = \emptyset$.

Необхідно відмітити зв'язок між $\bar{P}_s$, $\tilde{P}_s$ та партіями контейнерів P_i^j . Множина $\bar{P}_s$ містить партії, які приймаються в цьому порті та адресовані в наступні порти, тому $\bar{P}_s = \bigcup P_s^{j>s}$. В свою чергу, множина $\tilde{P}_s$ містить партії, адресовані в даний порт і завантажені в попередніх портах, отже, $\tilde{P}_s = \bigcup P_{j<s}^s$.

Так як в першому порту проводиться тільки завантаження партій контейнерів, тому $\text{Prt}_1^{m1}(\frac{\bar{P}_1}{\emptyset})$. Аналогічно в останньому порту партії контейнерів тільки вивантажуються, тоді $\text{Prt}_N^{mN}(\frac{\emptyset}{\tilde{P}_N})$.

Завантаження судна G_s визначається партіями контейнерів з урахуванням їх розміщення, що знаходяться на борту судна, після завершення вантажних операцій і перед виходом судна з s -го порту. Так, завантаження судна в першому порту G_1 представляє множину партій контейнерів, які завантажуються. Отже, $G_1 = \bar{P}_1$. У другому порту $\text{Prt}_2^{m2}(\frac{\bar{P}_2}{\tilde{P}_2})$ число партій на судні збільшилось на $\bar{P}_2$ і зменшилось на $\tilde{P}_2$ партій. Тому $G_2 = G_1 \cup \bar{P}_2 / \tilde{P}_2$. Узагальнюючи попередній вираз, можна отримати наступне співвідношення:

$$G_s = G_{s-1} \cup \bar{P}_s / \tilde{P}_s. \quad (4.2)$$

Завершальне завантаження при виході з $N-1$ -го порту $G_{N-1} = \tilde{P}_N = \bigcup P_i^N$. У разі, якщо завантаження здійснюється тільки в першому порту з подальшими вивантаженнями в інших портах, то $G_1 = \bigcup_{j=2}^N P_1^j$. З огляду на те, що в кожному з наступних портів вивантажується тільки одна партія контейнерів, то $G_2 = \bigcup_{j=3}^N P_1^j$ або $G_2 = G_1 / P_1^2$.

Отже, для даного випадку отримаємо $G_s = G_{s-1} / P_1^s$ та $G_{N-1} = P_1^N$. Відзначимо для даного випадку, що кожне завантаження містить всі наступні завантаження, тобто справедливе співвідношення:

$$G_s \subset G_1, \quad (s=1 \dots N-1) \text{ и } \bigcup_{s=2}^{N-1} G_s = G_1.$$

Розглянемо приклад послідовності заходу судна в 5 портів:

$$\text{Prt}_s^m = \text{Prt}_1^1, \text{Prt}_2^2, \text{Prt}_3^1, \text{Prt}_4^3, \text{Prt}_5^2.$$

З урахуванням перевезених партій контейнерів:

$$\text{Prt}_s^m = \text{Prt}_1^1\left(\frac{P_1^2, P_1^4, P_1^5}{\emptyset}\right), \text{Prt}_2^2\left(\frac{\emptyset}{P_1^2}\right), \text{Prt}_3^1\left(\frac{P_3^4, P_3^5}{\emptyset}\right), \text{Prt}_4^3\left(\frac{P_4^5}{P_1^4, P_3^4}\right),$$

$$\text{Prt}_5^2\left(\frac{\emptyset}{P_1^5, P_3^5, P_4^5}\right).$$

З наведеного виразу випливає, що в першому порті прийнята партія P_1^2 для другого порту, партія P_1^4 для четвертого порту і партія P_1^5 для п'ятого порту. У другому порті тільки вивантажується партія P_1^2 , а в третьому порті приймаються партії P_3^4 для четвертого порту і P_3^5 для п'ятого порту. У четвертому порті вивантажуються партії P_1^4 і P_3^4 , після чого проводиться навантаження партії P_4^5 для п'ятого порту. В останньому п'ятому порті вивантажуються партії P_1^5 , P_3^5 і P_4^5 .

Графічне представлення зазначеного рейсу показано на рисунку 4.1.

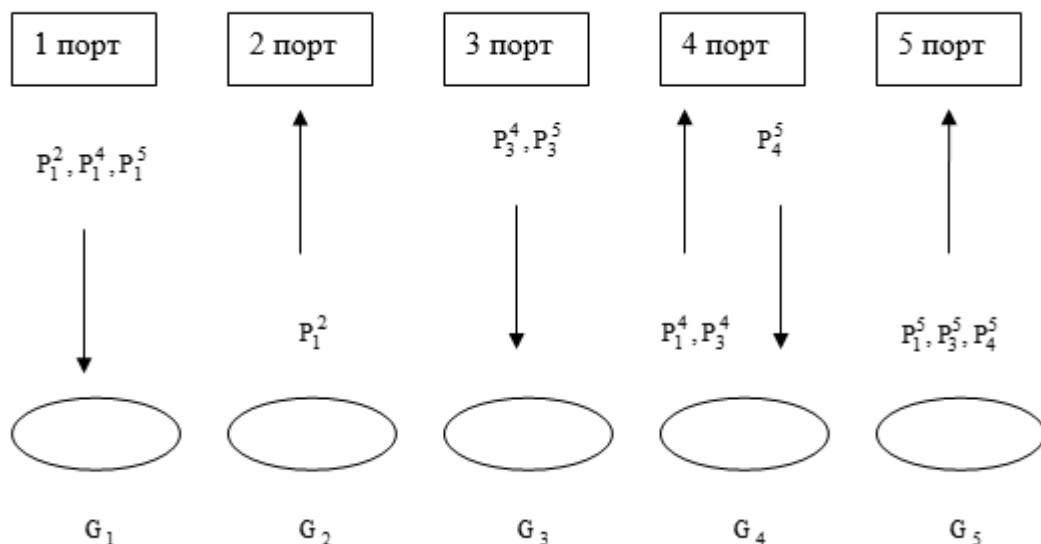


Рисунок 4.1 – Графічне представлення зазначеного рейсу

Очевидно, для розглянутого прикладу справедливі співвідношення:

$$\bar{P}_1 = P_1^2, P_1^4, P_1^5; \quad \tilde{P}_1 = \emptyset;$$

$$\bar{P}_2 = \emptyset; \quad \tilde{P}_2 = P_1^2;$$

$$\bar{P}_3 = P_3^4, P_3^5; \quad \tilde{P}_3 = \emptyset;$$

$$\bar{P}_4 = P_4^5; \quad \tilde{P}_4 = P_1^4, P_3^4;$$

$$\bar{P}_5 = \emptyset; \quad \tilde{P}_5 = P_1^5, P_3^5, P_4^5;$$

Завантаження судна G_s ($s = 1 \dots 5$) визначається за допомогою виразу (4.2) і визначається наступним чином:

$$G_1 = \bar{P}_1 = P_1^2, P_1^4, P_1^5, \text{ або } G_1 = P_1^2, P_1^4, P_1^5;$$

$$G_2 = G_1 \cup \bar{P}_2 / \tilde{P}_2 = P_1^2, P_1^4, P_1^5 \cup \emptyset / P_1^2 = P_1^4, P_1^5; \text{ або } G_2 = P_1^4, P_1^5;$$

$$G_3 = G_2 \cup \bar{P}_3 / \tilde{P}_3 = P_1^4, P_1^5 \cup P_3^4, P_3^5 / \emptyset = P_1^4, P_1^5, P_3^4, P_3^5; \text{ або } G_3 = P_1^4, P_1^5, P_3^4, P_3^5;$$

$$G_4 = G_3 \cup \bar{P}_4 / \tilde{P}_4 = P_1^4, P_1^5, P_3^4, P_3^5 \cup P_4^5 / (P_1^4, P_3^4) = P_1^5, P_3^5, P_4^5; \text{ або } G_4 = P_1^5, P_3^5, P_4^5.$$

У загальному випадку важливі два основних аспекти завантаження судна:

- формування тензору завантаження, що представляє розподіл мас партій контейнерів по вантажних приміщеннях, 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.

Завантаження G_s доцільно представити таким чином:

$$G_s = \{P_s, \hat{P}_s, P_{bs}, P_{zs}, Q_s\}, \quad (4.3)$$

де $\hat{P}_s$ – множина партій контейнерів, вивантаження яких передбачене в наступному порті і доступ до них повинен бути вільний;

P_s – множина інших партій, призначених в інші порти;

Q_s – тензор завантаження, що відображає розміщення партій контейнерів з вантажних приміщень, а також баласту і запасів по танках.

Множини P_s і $\hat{P}_s$ пов'язані з партіями контейнерів P_1^j наступним чином. Множина $\hat{P}_s$ складається з партій, прийнятих до моменту часу відходу судна з даного порту і адресовані для вивантаження в наступному порті, що формально записується в такий спосіб $\hat{P}_s = \bigcup_{j \leq s} P_1^{j+s+1}$. Множина P_s містить партії, адресовані в порти, які слідують за черговим портом, тому $P_s = \bigcup_{j \leq s} P_1^{j+s+1}$. Таким чином, отримаємо:

$$\hat{P}_s = \bigcup_{j \leq s} P_1^{j+s+1}; \quad P_s = \bigcup_{j \leq s} P_1^{j+s+1}. \quad (4.4)$$

Для наведеного прикладу множини P_s та $\hat{P}_s$ знаходимо, використовуючи вираз (4.4):

$$\begin{aligned} \hat{P}_1 &= P_1^2; & P_1 &= P_1^4, P_1^5; \\ \hat{P}_2 &= \emptyset; & P_2 &= P_1^4, P_1^5; \\ \hat{P}_3 &= P_1^4, P_3^4; & P_3 &= P_1^5, P_3^5; \\ \hat{P}_4 &= P_1^5, P_3^5, P_4^5; & P_4 &= \emptyset; \end{aligned}$$

Після завершення вантажних операцій в s -м порту тензор завантаження Q_s повинен забезпечити допустимий морехідний стан $M_s \in Mn_{sf}$, де Mn_{sf} – множина безпечних морехідних станів, а значення сил інерції хитавиці F_{jk} , діючої на контейнер, має перебувати в допустимих

межах, тобто $F_{jk1} < F_{jd}$. На цьому етапі слід мінімізувати кількість прийнятого баласту.

Далі проводиться детальне формування окремих «теоретичних» тензорів завантаження по вантажним приміщенням, які представляють собою розподіл мас партій по беям 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 беям (X) і ярусам (Z). Розміщення контейнерів в ярусах (Y) проводиться для формування моменту інерції судна відносно поздовжньої вісі з метою мінімізації сил інерції.

Обов'язковою вимогою є те, щоб на кожному переході між портами після завершення вантажних операцій, завантаження судна повинно бути оптимальним за обома критеріями.

4.2 Врахування доступності партій, які вивантажуються, при формуванні укрупненого тензору завантаження судна

Формування укрупненого тензору завантаження судна передбачає планування розміщення партій контейнерів по вантажних приміщеннях 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 G_s (4.3) перед черговим переходом між портами повинна задовольняти вимогам морехідної безпеки і силам інерції хитавиці.

Відносно першої умови слід зазначити наступне. Аналізуючи вирази (4.2) і (4.3), робимо висновок, що першим необхідно розглянути заключне завантаження $G_{N-1} = \cup P_i^N$ перед останнім переходом судна між $N-1$ та N портами рейсу, яке містить партії вантажу, адресовані в останній порт. Так як решта партій контейнерів вивантажені в попередніх портах, то доступність до партій заключного завантаження очевидна. Далі від заключного завантаження потрібно розглядати попередні завантаження в зворотному порядку. Так як попереднє G_{s-1} і поточне G_s завантаження пов'язані у відповідності з виразом (4.2), то справедливий вираз:

$$G_{s-1} = G_s \cup \tilde{P}_s / \bar{P}_s. \quad (4.5)$$

З останнього виразу (4.5) випливає, що попереднє завантаження G_{s-1} можна отримати, включаючи в поточне завантаження G_s множини $\tilde{P}_s$ вивантажених в поточному s -му порті партій та виключаючи з неї множину $\bar{P}_s$ прийнятих для перевезення партій. Наведене співвідношення істинне, якщо є можливість в s -му порті прийняти множину партій $\bar{P}_s$ після вивантаження множини партій контейнерів $\tilde{P}_s$. Якщо загальна вантажомісткість судна характеризується числом N_c контейнерних місць, то перед початком вантажних операцій в s -му порті число контейнерів на судні становить $N_{cs}^{(f)}$ та має $N_{cs}^{(e)}$ вільних контейнерних місць, причому $N_c = N_{cs}^{(f)} + N_{cs}^{(e)}$.

В процесі вантажних операцій планується прийом $\bar{N}_{cs}$ контейнерів і вивантаження $\tilde{N}_{cs}$ контейнерів. Очевидно, що попереднє завантаження можливе, якщо $\bar{N}_{cs} \leq (N_{cs}^{(e)} + \tilde{N}_{cs})$, що означає умову достатньої вантажомісткості. Якщо вагу множини прийнятих партій позначити $\bar{W}_{cs}$, а вагу партій контейнерів, які вивантажуються, через $\tilde{W}_{cs}$, то нерівність

$\bar{W}_{cs} \leq \tilde{W}_{cs} + \Delta W_s$ характеризує умову допустимості за вантажопідйомністю, в якому ΔW_s – запас вантажопідйомності. Тому умови існування попереднього завантаження G_{s-1} по вантажомісткості і вантажопідйомності:

$$\begin{aligned}\bar{N}_{cs} &\leq (N_{cs}^{(e)} + \tilde{N}_{cs}); \\ \bar{W}_{cs} &\leq \tilde{W}_{cs} + \Delta W_s.\end{aligned}\quad (4.6)$$

Якщо умова (4.6) виконується для всіх завантажень судна, то заданий рейс по вантажомісткості і вантажопідйомності можливий.

Розглянемо більш докладно питання розміщення партій контейнерів, що забезпечують їх доступність в порту вивантаження. Для цього зробимо деякі попередні зауваження.

Відзначимо, що одна партія контейнерів може розміщуватися в декількох вантажних приміщеннях, тобто:

$$P_i^j(W_i, N_i) = \bigcup_k P_i^j(k, W_{i,k}, N_i),$$

де k – номер вантажного приміщення.

Якщо партія вантажу розміщується в одному приміщенні, то

$$P_i^j(W_i, N_i) = P_i^j(k, W_{i,k}, N_i).$$

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 до різних партій.

Випадок, коли завантаження виконується в одному порті та забезпечується доступність всіх партій, розглянуто в роботі [89]. Надалі

будемо розглядати прийом партій вантажу в декількох портах, причому в кожному порті можливий прийом партій вантажу для декількох портів.

Відзначимо деякі зауваження щодо дотримання доступності:

1. У разі, 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), як показано на рисунку 4.2.

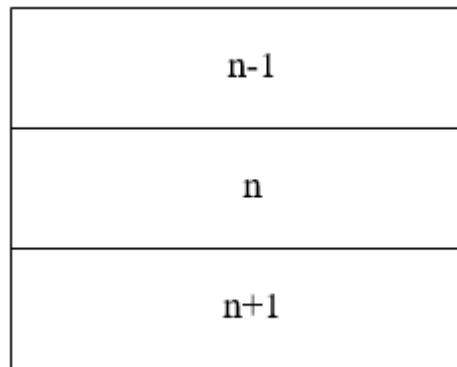


Рисунок 4.2 – Горизонтальна межа поділу

3. Якщо у вантажному приміщенні розміщено кілька партій контейнерів, кожна з яких займає його частину і не перекривається зверху іншою партією (вертикальна межа поділу) (рис. 4.3).

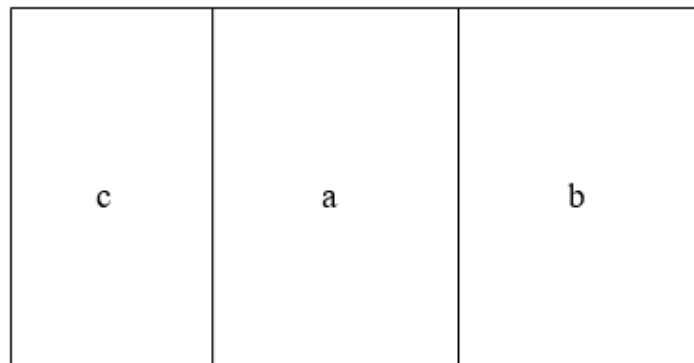


Рисунок. 4.3 – Вертикальна межа поділу

Для розташування двох партій в трюмі доступність до них ($d = 1$) формально виражається в такий спосіб:

$$(P_m^n, P_s^f)_{d=1} = \begin{cases} P_m^n \rightarrow P_s^f, & n \geq f \\ P_m^n \uparrow P_s^f & \end{cases}.$$

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

На рисунку 4.4 суміжними партіями є:

$(1 \uparrow 2), (1 \rightarrow 4), (2 \rightarrow 4), (2 \uparrow 3), (2 \uparrow 5), (4 \uparrow 5), (3 \rightarrow 5), (4 \rightarrow 6), (4 \rightarrow 7),$
 $(6 \uparrow 7), (6 \rightarrow 8), (7 \rightarrow 8).$

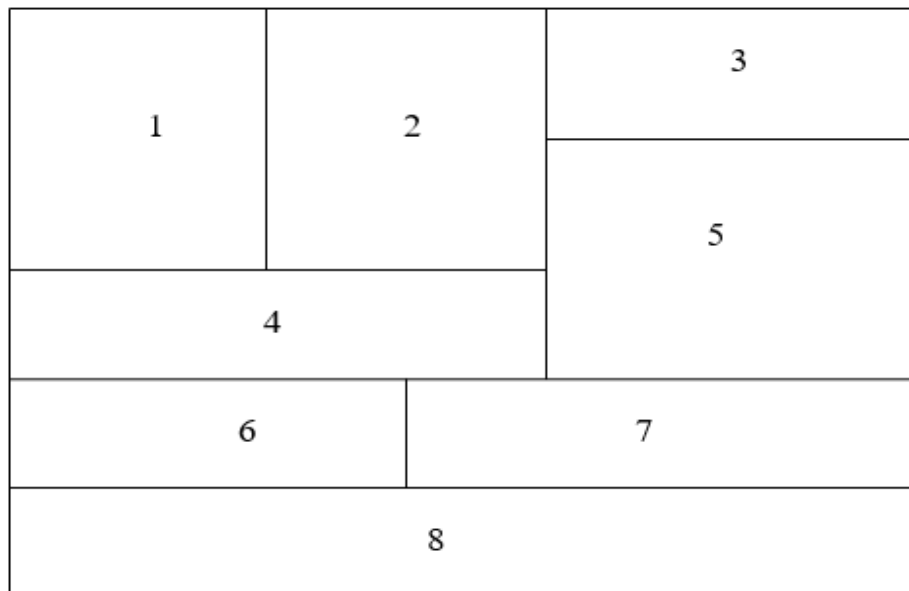


Рисунок 4.4 – Суміжні партії вантажу

Якщо номери партій у наведеному прикладі відповідають номерам черговості портів вивантаження, то доступність всіх партій вантажу, що знаходяться в трюмі, забезпечена.

Правило завантаження, що забезпечує вимогу доступності полягає в тому, що прийняті в s -му порті партії контейнерів призначені далі, ніж в $s+1$ -й порт, не повинні перекривати партії, які вивантажуються раніше. Також можливе завантаження в порожнє вантажне приміщення або з вертикальною суміжною межею:

$$P_s^{j>s+1} \rightarrow P_{i<s}^{j>s+2}, \text{ або } P_s^{j>s} \uparrow P_{i<s}^{j>s}. \quad (4.7)$$

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.

Розглядаючи питання про доступність до партій контейнерів, доцільно починати аналіз з останнього завантаження G_{N-1} , що складається з партій контейнерів, адресованих в останній порт. Припустимо, до складу останнього завантаження входять партії вантажів $P_{s1}^N, P_{s2}^N, \dots, P_{sM}^N$. Причому номери портів відповідають черговості заходу до них. Раніше всіх відбувається завантаження партії P_{s1}^N , під цю партію має бути виділено вільне приміщення або приміщення з вертикальною роздільною межею. Якщо приміщення під партію P_{s1}^N позначити H_{s1}^N , то ці приміщення повинні бути порожні в порту $s1$. Якщо порт $s1$ не є першим, то приміщення H_{s1}^N , які раніше завантажені іншими партіями, повинні звільнитися до моменту завантаження партії P_{s1}^N (1) або бути вільними з початку рейсу (2). Варіант (1) можливий, якщо до порту $s1$ є порт вивантаження p , причому $s1 \geq p$. Якщо ж перший порт вивантаження $p1$ знаходиться після порту $s1$, тобто $s1 < p1$, то має місце варіант (2). Для подальшої формалізації приймаємо такі позначення: $\bar{P}_i^j$ і $\tilde{P}_i^j$ – відповідно завантажені і вивантажені партії контейнерів; $\bar{H}_i^j$ та $\tilde{H}_i^j$ – відповідно заповнені і вільні приміщення; $\hat{H}_i^j$ – частково завантажені приміщення; $\bar{H}_s, \tilde{H}_s$ – відповідно всі заповнені і вільні приміщення судна в s -му порті; H_0 – всі приміщення судна, причому

$$H_0 = \bar{H}_s \cup \tilde{H}_s.$$

У цьому випадку варіант (1) має наступний формальний запис:

$$\bigcup \tilde{P}_{i < s1}^{p \leq s1} \rightarrow \tilde{H}_i^p \rightarrow \tilde{H}_{s1}^N \rightarrow \bar{P}_{s1}^N, \text{ причому } \tilde{H}_i^p \supset \tilde{H}_{s1}^N.$$

В свою чергу, варіант (2) формально записується в такий спосіб:

$$\tilde{H}_{s1} \rightarrow \tilde{H}_{s1}^N \rightarrow \bar{P}_{s1}^N, \text{ причому } \tilde{H}_{s1} \supset \tilde{H}_{s1}^N.$$

В порту s2 проводиться завантаження чергової партії P_{s2}^N . Так як партія контейнерів може розміщуватися в декількох вантажних приміщеннях, які можуть бути завантажені частково, то в вантажному приміщенні можуть перебувати контейнери кількох партій. Тому доступність партії P_{s2}^N , крім раніше розглянутих варіантів (1) і (2), може здійснитися ще двома способами. При наявності достатнього місця партія P_{s2}^N розміщується в частково завантажених приміщеннях $\hat{H}_{s1}^N$ партії P_{s1}^N , тобто $\tilde{H}_{s2}^N \subset \hat{H}_{s1}^N$ (3) або в іншому випадку частина партії P_{s2}^N розміщується в приміщеннях $\hat{H}_{s1}^N$, а залишок – в вільних приміщеннях $\tilde{H}_{s2}$ (4). Формальний запис для чотирьох перерахованих варіантів розміщення партії P_{s2}^N записується наступним чином:

$$\bigcup \tilde{P}_{i < s2}^{p \leq s2} \rightarrow \tilde{H}_i^p \rightarrow \tilde{H}_{s2}^N \rightarrow \bar{P}_{s2}^N, \text{ причому } \tilde{H}_i^p \supset \tilde{H}_{s2}^N. \quad (1)$$

$$\tilde{H}_{s2} \rightarrow \tilde{H}_{s2}^N \rightarrow \bar{P}_{s2}^N, \text{ причому } \tilde{H}_{s2} \supset \tilde{H}_{s2}^N. \quad (2)$$

$$\hat{H}_{s1}^N \rightarrow \tilde{H}_{s2}^N \rightarrow \bar{P}_{s2}^N, \text{ причому } \hat{H}_{s1}^N \supset \tilde{H}_{s2}^N. \quad (3)$$

$$(\hat{H}_{s1}^N \cup \tilde{H}_{s2}) \rightarrow \tilde{H}_{s2}^N \rightarrow \bar{P}_{s2}^N, \text{ причому } (\hat{H}_{s1}^N \cup \tilde{H}_{s2}) \supset \tilde{H}_{s2}^N. \quad (4)$$

У загальному випадку для довільної партії P_{sm}^N останнього завантаження G_{N-1} слід зазначити наступне. Якщо порт завантаження партії є

початковим портом, тобто $sm=1$, то розміщення партії P_1^N можливо тільки варіантом (2), використовуючи вільні суднові приміщення $\tilde{H}_1$. Якщо перша партія для останнього порту призначення завантажується не в першому порті, тобто $sm=s_1>1$, то розміщення такої партії $P_{s_1}^N$ можливо варіантами (1) або (2). У разі, коли $sm>s_1$, можливий варіант (3) розміщення партії P_{sm}^N в частково завантажених приміщеннях містять партії $P_{i<sm}^N$ для останнього порту. Очевидно, для даного випадку можливий варіант (4) додаткового використання вільних приміщень судна.

Можливі доступні розміщення партії P_{sm}^N формалізуються в такий спосіб:

$$\bigcup_{i<sm} \tilde{P}_{i<sm}^{p\leq sm} \rightarrow \tilde{H}_i^p \rightarrow \tilde{H}_{sm}^N \rightarrow \bar{P}_{sm}^N, \text{ причому } \tilde{H}_i^p \supset \tilde{H}_{s_2}^N \text{ і } sm \geq p. \quad (1)$$

$$\tilde{H}_{sm} \rightarrow \tilde{H}_{sm}^N \rightarrow \bar{P}_{sm}^N, \text{ причому } \tilde{H}_{sm} \supset \tilde{H}_{sm}^N \text{ і } sm < p_1. \quad (2)$$

$$\bigcup \hat{H}_{i<sm}^N \rightarrow \tilde{H}_{sm}^N \rightarrow \bar{P}_{sm}^N, \text{ причому } \bigcup \hat{H}_{i<sm}^N \supset \tilde{H}_{s_2}^N. \quad (3)$$

$$(\bigcup \hat{H}_{i<sm}^N \cup \tilde{H}_{sm}) \rightarrow \tilde{H}_{sm}^N \rightarrow \bar{P}_{sm}^N, \text{ причому } (\bigcup \hat{H}_{i<sm}^N \cup \tilde{H}_{sm}) \supset \tilde{H}_{sm}^N. \quad (4)$$

Найбільш доцільним у разі наявності можливості реалізації є варіант (1), що дозволяє максимально використовувати вантажомісткість і вантажопідйомність судна. Варіант (3) може бути доцільним у разі прийому партій контейнерів, адресованих в останній порт, в більшості портів завантаження.

Так як розміщення партій проводиться при їх завантаженні, то для забезпечення їх доступності слід керуватися принципом завантаження (4.7).

4.3 Формування укрупненого тензору завантаження згідно вимог морехідної безпеки судна

Як раніше зазначалося, під час планування укрупненого тензору необхідно починати з останнього завантаження судна $G_{N-1} = \cup P_i^N$. Дане завантаження, як і інші, повинно задовольняти вимогам морехідної безпеки. Розглянемо це питання більш детально.

Збільшення статичних моментів ΔM_x , ΔM_y та ΔM_z , які виникають в результаті прийому партій контейнерів останнього завантаження судна G_{N-1} , визначаються наступним чином:

$$\Delta M_x = \sum_{k=1}^n {}_k W_i^N {}_k X_i^N;$$

$$\Delta M_y = \sum_{k=1}^n {}_k W_i^N {}_k Y_i^N;$$

$$\Delta M_z = \sum_{k=1}^n {}_k W_i^N {}_k Z_i^N;$$

$$W_i^N = \sum_{k=1}^n {}_k W_i^N,$$

де n – кількість вантажних приміщень;

${}_k W_i^N$ – вага вантажу партії ${}_k P_i^N$ в k -м приміщенні;

${}_k X_i^N$, ${}_k Y_i^N$ та ${}_k Z_i^N$ – координати центру ваги партії ${}_k P_i^N$.

Для забезпечення морехідної безпеки збільшення статичних моментів ΔM_x , ΔM_y і ΔM_z повинні відповідати таким вимогам:

$$\Delta M_x \in \Delta M_d; \Delta M_y = 0; \Delta M_z \in \Delta M_h, \quad (4.8)$$

де ΔM_d і ΔM_h – множини моментів, які забезпечують необхідні значення диференту, остійності та загальної поздовжньої міцності судна.

Розглянемо процедуру оцінки множин моментів ΔM_d та ΔM_h . Перш за все, відзначимо, що в результаті завантаження контейнерів диферент судна d повинен знаходитися в межах від 0 до $-2,0$ м. З вказаного інтервалу

вибирається диферент, якому відповідало би розміщення контейнерів, що задовольняє вимогам поздовжньої міцності. Тому для завантаження судна необхідно знайти граничні значення моменту $M_{X(0)}$ і $M_{X(-2)}$, які забезпечують диферент судна 0 і $-2,0$ м. Для цього скористаємося відомими залежностями [5]:

$$M_X = D(x_g - x_c), \quad d = M_X / \bar{M},$$

де x_g і x_c – відповідно абсциса центру ваги судна і абсциса центру величини, яка відповідає водотоннажності D ;

$\bar{M}$ – момент, диферентуючий судно на один сантиметр.

Очевидно, в цьому випадку:

$$x_g = x_c + \frac{d\bar{M}}{D}.$$

З іншого боку:

$$x_g = \frac{M_{Xp} + M_{Xz} + M_{Xb} + M_{Xc}}{D},$$

де M_{Xp} , M_{Xz} , M_{Xb} , та M_{Xc} – складові моменту M_X відповідно судна порожнього, запасів, баласту і вантажу.

Очевидно, що цікавить нас складова M_{Xc} , яка виникає від завантаження контейнерів, і, з урахуванням двох останніх рівностей, визначається з виразу:

$$M_{Xc} = Dx_c + d\bar{M} - \Delta\tilde{M}_X,$$

де $\Delta\tilde{M}_X = M_{Xp} + M_{Xz} + M_{Xb}$, або $\Delta\tilde{M}_X = M_{Xconst} + M_{Xb}$.

Причому $M_{Xconst} = M_{Xp} + M_{Xz}$ – постійна величина.

Тому граничні моменти $M_{Xc(0)}$ і $M_{Xc(-2)}$ партій контейнерів завантаження розраховуються за формулами:

$$M_{xc(0)} = D_1 x_{c1} - \Delta \tilde{M}_x;$$

$$M_{xc(-2)} = D_1 x_{c1} - 200 \bar{M} - \Delta \tilde{M}_x,$$

де D_1 – водотоннажність судна після завантаження.

Очевидно, множина $\Delta M_d = [M_{xc(0)}, M_{xc(-2)}]$.

Аналогічно визначається граничне значення статичного моменту M_{z*} , при якому метацентрична висота дорівнює мінімальному значенню 0,15 м. За визначенням:

$$h = Z_m - Z_g = 0,15 \text{ та } Z_g = \frac{M_{z*}}{D}.$$

Отже,

$$M_{z*} = D(Z_m - 0,15).$$

Так як $M_{z*} = M_{zc*} + \Delta \tilde{M}_z$, де величина $\Delta \tilde{M}_z = M_{zp} + M_{zz} + M_{zb}$, то граничний статичний момент M_{zc*}^* , створюваний партіями завантажених контейнерів, визначається виразом:

$$M_{zc}^* = D(Z_m - 0,15) - \Delta \tilde{M}_z.$$

В даному випадку $\Delta \tilde{M}_z = M_{zconst} + M_{zb}$, де M_{zconst} є постійною величиною.

Для гранично допустимої максимальної метацентричної висоти h_{mx} статичний момент M_{zc*} розраховується за формулою:

$$M_{zc*} = D(Z_m - h_{mx}) - \Delta \tilde{M}_z.$$

Тому $\Delta M_h = [M_{zc*}, M_{zc}^*]$.

В цьому випадку для забезпечення остійності приріст статичного моменту ΔM_z завантаження обирається наступним чином:

$$\Delta M_z = \sum_j M_{hj} = M_h \in \Delta M_h, \quad (4.9)$$

де M_{hj} – вертикальний статичний момент, створюваний j -й партією завантаження.

Розглянемо розміщення партій контейнерів останнього завантаження G_{N-1} по вантажним приміщенням судна, завдяки якому створюється заданий диферентуючий момент $M_d \in \Delta M_d$. В цьому випадку має виконуватися рівність $\Delta M_x = M_d$. Разом з цим, слід задавати M_d якомога ближче до середнього значення інтервалу ΔM_d . Так як завантаження G_{N-1} містить партії контейнерів P_i^N , то статичний момент ΔM_x є сумою моментів ΔM_{xi} партій контейнерів P_i^N , тобто $\Delta M_x = \sum \Delta M_{xi}$. Очевидно, що моменти ΔM_{xi} партій доцільно вибирати пропорційними їх вазі W_i^N , тобто $\Delta M_{xi} = \Delta M_x \frac{W_i^N}{W_{GN}}$, де $W_{GN} = \sum W_i^N$ – сумарна вага контейнерів останнього завантаження G_{N-1} . Партії контейнерів P_i^N розміщуються у відповідних приміщеннях H_i^N , причому під приміщенням партії має на увазі множина відділів з координатами їх центру, кількість яких дорівнює кількості контейнерів в партії. Приміщення партії може складатися з декількох повністю або частково використаних трюмів, відділи яких заповнені без пропусків. Структура приміщення представляється беями, ярусами і рядами. Розподіл ваги партії контейнерів P_i^N по вантажних приміщеннях H_i^N , тобто контейнерів по відділах вантажних приміщень, Q_i^N має створити необхідний момент ΔM_{xi} . Цей момент визначається розміщенням контейнерів по беям приміщень H_i^N .

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 $Q_1^N \subset Q_i$. При наявності постійної складової Q_1^N для розміщення контейнерів партії P_1^N обираються приміщення H_1^N в центрі судна, які симетричні мідель-шпангоуту.

Якщо в першому порті не завантажуються партія для останнього порту, то розглянутий порядок вибору приміщень проводиться для партії, яка першою завантажуються для останнього порту.

Для розміщення Q_i^N інших партій контейнерів P_i^N обираються приміщення H_i^N які розташовані симетрично H_1^N або збігаються з приміщеннями завантаження інших партій.

Розподіл ваги партії контейнерів останнього завантаження судна G_{N-1} по вантажним приміщенням повинно задовольняти рівнянням:

$$\Delta M_x = \sum \Delta M_{xi} = \sum M_{di} = M_d = \sum_{k=1}^n W_i^N X_i^N;$$

$$\sum_{k=1}^n W_i^N = W_{GN},$$

де n – кількість вантажних приміщень в наборі H_{N-1} .

Перш за все, необхідно перевірити, чи є можливість забезпечити величину моменту M_d вагою контейнерів завантаження судна G_{N-1} розміщенням в приміщеннях H_{N-1} . Для цього необхідно оцінити максимальний момент $\Delta M_{x\max}$, який є сумою максимальних моментів $\Delta M_{x\max i}$ партій контейнерів P_i^N . Розглянемо визначення величини $\Delta M_{x\max i}$, для чого слід провести ранжування контейнерів партії P_i^N , яку представимо множиною Mp_i^N , в послідовності зменшення їх ваги, тобто елементи множини Mp_i^N упорядковуються за ознакою ваги. Множина Mp_i^N представляється послідовністю ваг контейнерів $w_{ci} \succ$, причому $w_{ci} \geq w_{ci+1}$,

тобто першим членом послідовності є контейнер з максимальною вагою w_{c1} , а останнім – контейнер з мінімальною вагою w_{cd} . Надалі послідовність $w_{ci} \succ = \{w_{c1} \geq w_{c2} \geq \dots \geq w_{cd-1} \geq w_{cd}\}$ розглядаємо в якості множини Mn_i^N .

Створення максимально можливого збільшення моменту $\Delta M_{x_{\max i}}$ вимагає поділу послідовності $w_{ci} \succ = \{w_{c1} \geq w_{c2} \geq \dots \geq w_{cd-1} \geq w_{cd}\}$ на m (за кількістю приміщень H_i^N партії) послідовних непересічних підмножин $\tilde{S}p_i$ ($i=1\dots m$), кожне з яких містить m_{hi} (яка дорівнює кількості відділів вантажного приміщення) упорядкованих за вагою контейнерів. Якщо вагу контейнерів підмножини $\tilde{S}p_i$ позначити P_i , то, очевидно, $P_1 \geq P_2 \geq \dots \geq P_m$. Якщо підмножини $\tilde{S}p_i$ контейнерів з вагою P_i розмістити по відповідних вантажних приміщеннях H_i^N , починаючи з корми в ніс по спадаючій величини P_i , то буде досягнутим максимальний приріст моменту $\Delta M_{x_{\max i}}$.

Аналогічно знаходимо максимальний приріст моментів $\Delta M_{x_{\max i}}$ відносно інших партій завантаження судна G_{N-1} . Складаючи отримані значення $\Delta M_{x_{\max i}}$, знаходимо оцінку $\Delta M_{x_{\max}}$ від партій останнього завантаження судна G_{N-1} . У випадку якщо $|\Delta M_{x_{\max}}| \geq |M_d|$, то існує підмножина допустимих завантажень без прийому баласту.

Партія контейнерів P_i^N , яка розміщена в вантажних приміщеннях H_i^N , повинна створювати диферентуючий момент $M_{di} = \sum_{j=1}^m \Delta M_{dij}$, причому створюваний j -м вантажним приміщенням з набору H_i^N приріст заданого моменту ΔM_{dij} виражається у формі:

$$\Delta M_{dij} = \{k_{ij} P_{spi} + \frac{j X_i^N}{L} \Delta P\}_j X_i^N,$$

де k_{ij} – частина j -го вантажного приміщення, яку займає партія ${}_jP_i^N$;

L – сумарна довжина всіх вантажних приміщень судна;

${}_jX_i^N$ – абсциса центру ваги партії ${}_kP_i^N$.

Для всіх вантажних приміщень набору H_i^N , в яких розміщується партія ${}_iP_i^N$, справедливим є вираз:

$$\sum_{j=1}^m \{k_{ij}P_{cpi} + \frac{{}_jX_i^N}{L} \Delta P\} {}_jX_i^N = M_{di},$$

з якого

$$\sum_{j=1}^m k_{ij}P_{cpi} {}_jX_i^N + \sum_{j=1}^m \frac{{}_jX_i^N}{L} \Delta P {}_jX_i^N = M_{di}, \text{ або}$$

$$\frac{\Delta P}{L} \sum_{j=1}^m ({}_jX_i^N)^2 = M_{di} - \sum_{j=1}^m k_{ij}P_{cpi} {}_jX_i^N, \text{ тому}$$

$$\Delta P = \frac{L(M_{di} - \sum_{j=1}^m k_{ij}P_{cpi} {}_jX_i^N)}{\sum_{j=1}^m ({}_jX_i^N)^2}. \quad (4.10)$$

Отже, кількість вантажу в j -му приміщенні визначається виразом:

$$P_j = k_{ij}P_{cpi} + \frac{{}_jX_i^N}{L} \Delta P,$$

або з урахуванням отриманого виразу для розрахунку ΔP :

$$P_j = k_{ij}P_{cpi} + \frac{{}_jX_i^N}{L} \left[\frac{L(M_{di} - \sum_{j=1}^m k_{ij}P_{cpi} {}_jX_i^N)}{\sum_{j=1}^m ({}_jX_i^N)^2} \right], \text{ або}$$

$$P_j = k_{ij}P_{cpi} + \frac{{}_jX_i^N}{\sum_{j=1}^m ({}_jX_i^N)^2} (M_{di} - \sum_{j=1}^m k_{ij}P_{cpi} {}_jX_i^N).$$

Знайдемо вираз для суми ваг P_j частин партії P_i^N по приміщенням:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^m \{k_{ij} P_{cpi} + \frac{j X_i^N}{\sum_{j=1}^m (j X_i^N)^2} (M_{di} - \sum_{j=1}^m k_{ij} P_{cpi} j X_i^N)\} = \\ P_{cpi} \sum_{j=1}^m k_{ij} + \frac{1}{\sum_{j=1}^m (j X_i^N)^2} \{ \sum_{j=1}^m [j X_i^N (M_{di} - \sum_{j=1}^m k_{ij} P_{cpi} j X_i^N)] \} = \\ P_{cpi} \sum_{j=1}^m k_{ij} + \frac{1}{\sum_{j=1}^m (j X_i^N)^2} \{ M_{di} \sum_{j=1}^m j X_i^N - P_{cpi} \sum_{j=1}^m [j X_i^N \sum_{j=1}^m k_{ij} j X_i^N] \} = W_i^N, \end{aligned}$$

де W_i^N – вага контейнерів партії P_i^N .

Введемо позначення постійних величин $A = \sum_{j=1}^m j X_i^N$, $B = \sum_{j=1}^m (j X_i^N)^2$,

$C = \sum_{j=1}^m [j X_i^N \sum_{j=1}^m k_{ij} j X_i^N]$, $D = \sum_{j=1}^m k_{ij}$ та отримаємо:

$$D P_{cpi} + \frac{1}{B} \{A M_{di} - C P_{cpi}\} = W_i^N. \quad (4.11)$$

З отриманого виразу випливає:

$$P_{cpi} (D - \frac{C}{B}) = W_i^N - \frac{A}{B} M_{di}.$$

Отже,

$$P_{cpi} = \frac{W_i^N - \frac{A}{B} M_{di}}{D - \frac{C}{B}}.$$

Підставляючи отриманий вираз для величини P_{cpi} в рівняння (4.11), переконуємося в правильності співвідношення:

$$D\left(\frac{W_i^N - \frac{A}{B}M_{di}}{D - \frac{C}{B}}\right) + \frac{1}{B}[AM_{di} - C\left(\frac{W_i^N - \frac{A}{B}M_{di}}{D - \frac{C}{B}}\right)] = W_i^N.$$

Покажемо коректність наведеної рівності.

$$\begin{aligned} D\left(\frac{W_i^N - \frac{A}{B}M_{di}}{D - \frac{C}{B}}\right) + \frac{1}{B}[AM_{di} - C\left(\frac{W_i^N - \frac{A}{B}M_{di}}{D - \frac{C}{B}}\right)] &= \frac{D}{D - \frac{C}{B}}(W_i^N - \frac{A}{B}M_{di}) + \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{1}{B(D - \frac{C}{B})}[A(D - \frac{C}{B})M_{di} - (W_i^N - \frac{A}{B}M_{di})C] = \\ &= \frac{1}{(D - \frac{C}{B})}(DW_i^N - D\frac{A}{B}M_{di} + D\frac{A}{B}M_{di} - \frac{AC}{B^2}M_{di} - \frac{C}{B}W_i^N + \frac{AC}{B^2}M_{di}) = \\ &= \frac{1}{(D - \frac{C}{B})}[(D - \frac{C}{B})W_i^N + (-D\frac{A}{B} + D\frac{A}{B} - \frac{AC}{B^2} + \frac{AC}{B^2})M_{di}] = W_i^N. \end{aligned}$$

Очевидно, сумарний момент ΔM_{xi} за всіма вантажним приміщенням набору H_i^N , в яких розміщується партія P_i^N , повинен дорівнювати M_{di} :

$$\Delta M_{xi} = \sum_{j=1}^m \{k_{ij}P_{cpi} + \frac{jX_i^N}{L}\Delta P\} X_i^N = M_{di}.$$

Для доказу в останню рівність підставляємо вираз (4.10) для ΔP та отримаємо:

$$\begin{aligned} \Delta M_{xi} &= \sum_{j=1}^m \{k_{ij}P_{cpi} + \frac{jX_i^N}{L}[\frac{L(M_{di} - \sum_{j=1}^m k_{ij}P_{cpi}X_i^N)}{\sum_{j=1}^m (jX_i^N)^2}]\} X_i^N = \\ &= \sum_{j=1}^m \{k_{ij}P_{cpi} + \frac{jX_i^N}{\sum_{j=1}^m (jX_i^N)^2}(M_{di} - \sum_{j=1}^m k_{ij}P_{cpi}X_i^N)\} X_i^N = \end{aligned}$$

$$P_{cpi} \sum_{j=1}^m k_{ij} X_i^N + \frac{M_{di}}{\sum_{j=1}^m (X_i^N)^2} \sum_{j=1}^m (X_i^N)^2 - \frac{P_{cpi}}{\sum_{j=1}^m (X_i^N)^2} \left(\sum_{j=1}^m k_{ij} X_i^N \right) \sum_{j=1}^m (X_i^N)^2 = M_{di}.$$

Таким чином, для завантаження партії P_i^N в приміщення H_i^N і створення необхідного диферентуючого моменту M_{di} в кожне j -е приміщення завантажують вагу:

$$P_j = k_{ij} P_{cpi} + \frac{j X_i^N}{L} \Delta P, \quad (4.12)$$

причому величина P_{cpi} розраховується за допомогою формули (4.11), а величина ΔP – за формулою (4.10). Аналогічно розміщуються інші партії контейнерів останнього завантаження G_{N-1} .

Як раніше зазначалося, далі слід розглядати попередні завантаження, тобто чергове завантаження G_{N-2} , яке пов'язане з останнім завантаженням G_{N-1} виразом (4.5). Тому справедливий вираз:

$$G_{N-2} = G_{N-1} \cup \tilde{P}_{N-1} / \bar{P}_{N-1}. \quad (4.13)$$

Як впливає з отриманого виразу, завантаження G_{N-2} можна отримати, включаючи в завантаження G_{N-1} множину $\tilde{P}_{N-1}$ вивантажених в $N-1$ -му порті партій та виключаючи з неї множину $\bar{P}_{N-1}$ прийнятих для перевезення партій. Завантаження G_{N-2} можна здійснити, якщо є можливість в $N-1$ -му порті прийняти множини партій $\bar{P}_{N-1}$ після вивантаження множини партій контейнерів $\tilde{P}_{N-1}$.

В $N-1$ -му порті планується прийняти $\bar{N}_{CN-1}$ контейнерів та вивантажити $\tilde{N}_{CN-1}$ контейнерів. Очевидно, що попереднє завантаження G_{N-2} можливе, якщо $\bar{N}_{CN-1} \leq (N_{CN-1}^{(e)} + \tilde{N}_{CN-1})$, де $N_{CN-1}^{(e)}$ – число вільних контейнерних місць. Якщо вага множини прийнятих партій становить $\bar{W}_{CN-1}$, а вага вивантажених

партій контейнерів – $\tilde{W}_{cN-1}$, то $\overline{W}_{cN-1} \leq \tilde{W}_{cN-1} + \Delta W_{cN-1}$ характеризує умову допустимості за вантажопідйомністю, в якій ΔW_{cN-1} – запас вантажопідйомності. Тому умова існування завантаження G_{N-2} по вантажомісткості і вантажопідйомності формально записується в такий спосіб:

$$\overline{N}_{cN-1} \leq (N_{cN-1}^{(e)} + \tilde{N}_{cN-1});$$

$$\overline{W}_{cN-1} \leq \tilde{W}_{cN-1} + \Delta W_{cN-1}.$$

Як раніше зазначалося, якщо в першому порті завантажуються 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 $Q_1^N \subset Q_i$.

Аналізуючи вираз (4.13), можна зробити наступні висновки. По-перше, якщо $N-1$ -й порт є портом 1-ї категорії, в якому проводиться тільки прийом множини партій $\overline{P}_{N-1}$, 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} наслідуює тензор Q_{N-1} .

По-друге, 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 $\overline{P}_{N-1}$, завантаження G_{N-2} можна отримати із завантаження G_{N-1} шляхом заміщення партій $\tilde{P}_{N-1}$ партіями $\overline{P}_{N-1}$. Очевидно тензор Q_{N-2} пов'язаний із тензором Q_{N-1} операцією заміщення деяких компонентів.

Отримано висновки щодо завантажень G_{N-2} та G_{N-1} , а також їх тензорів Q_{N-2} і Q_{N-1} , які справедливі для будь-яких суміжних завантажень G_i та G_{i+1} з їх тензорами.

Підводячи підсумки вищевикладеного матеріалу, відзначимо, що 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.

Покажемо формування тензорів завантаження з урахуванням отриманих операцій, звертаючись до раніше наведеного прикладу. Як було показано раніше, протягом рейсу судном перевозяться чотири завантаження G_i :

$$G_1 = P_1^2, P_1^4, P_1^5;$$

$$G_2 = P_1^4, P_1^5;$$

$$G_3 = P_1^4, P_1^5, P_3^4, P_3^5;$$

$$G_4 = P_1^5, P_3^5, P_4^5.$$

Звертаємо увагу на те, що всі завантаження містять загальну партію P_1^5 , яка створює постійну складову Q_1^5 тензорів всіх завантажень. Тензор Q_4 останнього завантаження G_4 формується доповненням до постійної складової Q_1^5 змінних складових, що виникають від розміщення партій P_3^5 і P_4^5 . Тому тензор Q_4 завантаження G_4 має вигляд:

$$Q_4 = Q_1^5 \cup Q_3^5 \cup Q_4^5.$$

Тензор Q_3 завантаження G_3 отриманий з тензора Q_4 шляхом заміщення змінної складової Q_4^5 іншою складовою $Q_1^4 \cup Q_3^4$. Отже, тензор Q_3 можна записати наступним чином:

$$Q_3 = Q_1^4 \cup Q_1^5 \cup Q_3^4 \cup Q_3^5.$$

Розглянемо тензор Q_2 завантаження G_2 . Звертаємо увагу на те, що він наслідує тензор Q_3 , так як входить до його складу за винятком змінної складової $Q_3^4 \cup Q_3^5$. Тому:

$$Q_2 = Q_1^4 \cup Q_1^5.$$

Нарешті, тензор Q_1 є додатком тензору Q_2 складової Q_1^2 та визначається за допомогою виразу:

$$Q_1 = Q_1^2 \cup Q_1^4 \cup Q_1^5.$$

Таким чином пов'язані між собою завантаження судна і їх тензори. Для завантаження партії контейнерів P_i^k вагою W_i^k в приміщення H_i^k і створення необхідного диферентуючого моменту M_{di} в кожне j -е приміщення завантажуються вага P_j , величина якої визначається формулою (4.12).

Розподіл ваг 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 .

4.4 Перетворення теоретичного тензору в реальний тензор

Припустимо, що партія P_j^k складається з N_p контейнерів, які утворюють множину Mn_{N_p} , причому вага кожного контейнеру дорівнює w_{ci} .

Множину Mn_{N_p} партії контейнерів необхідно розмістити по n вантажним приміщенням H_j^k , враховуючи, що кількість контейнерів кожного вантажного приміщення дорівнює кількості n_{hj} його відділів, виділеними для завантаження частини партії, таким чином, щоб вага контейнерів кожного вантажного приміщення була максимально близькою до отриманого значення P_j .

Необхідно відмітити, що кількість n_{hj} відділів вантажного приміщення обирається в залежності всієї їх кількості в приміщенні відповідно до числа, пропорційного вазі P_j , яка приймається. При цьому повинна виконуватись рівність:

$$\sum_{j=1}^n n_{hj} = N_p.$$

Для цього множину Mn_{N_p} контейнерів партії слід розділити на n підмножин Mn_j з кількістю контейнерів n_{hj} відповідного вантажного приміщення з урахуванням того, що вага контейнерів кожної з підмножин Mn_j (вантажного приміщення) максимально близька до P_j .

Рішення зазначеної задачі досягається наступним чином. Спочатку здійснюється ранжування контейнерів партії P_j^k , які представлені множиною Mn_{N_p} , в послідовності зменшення їх ваги, тобто елементи множини Mn_{N_p} упорядковуються за ознакою ваги. Множина Mn_{N_p} представляється послідовністю ваг контейнерів $w_{ci} \succ$, причому $w_{ci} \geq w_{ci+1}$, тобто першим членом послідовності є контейнер з максимальною вагою w_{c1} , а останнім –

контейнер с мінімальною вагою w_{cd} . Надалі послідовність $w_{ci} \succ = \{w_{c1} \geq w_{c2} \geq \dots \geq w_{cd-1} \geq w_{cd}\}$ розглядається в якості множини Mn_{Np} .

Із послідовності $w_{ci} \succ$ необхідно виділити фрагмент з n_{h1} послідовних контейнерів $\{w_{ci}\}_1 \succ$, сумарна вага яких $\tilde{P}_1$ мінімально відрізняється від розрахункового значення P_1 . Припустимо, фрагмент послідовності $\{w_{ci}\}_1 \succ$ починається контейнером з порядковим номером N_{n1} вихідної послідовності $w_{ci} \succ$ і закінчується контейнером з її порядковим номером N_{k1} . Отже, перша підмножина Mn_1 складає контейнери послідовності $w_{ci} \succ$, від N_{n1} -го до N_{k1} -го контейнерів включно, які складають фрагмент $\{w_{ci}\}_1 \succ$. Для цього фрагменту повинна виконуватися умова $|P_1 - \tilde{P}_1| = \min$, а через Sr_1 позначимо підмножину контейнерів першого вантажного приміщення.

Для формування чергової другої підмножини Mn_2 слід скористатися послідовністю, яка залишилася, $w_{ci}^1 \succ = w_{ci} \succ - \{w_{ci}\}_1 \succ$, причому справедливе співвідношення:

$$w_{ci}^1 \succ = \{w_{c1} \geq w_{c2} \geq \dots \geq w_{cN_{n1}-1} \geq w_{cN_{k1}+1} \dots \geq w_{cd-1} \geq w_{cd}\}.$$

Надалі з отриманої послідовності $w_{ci}^1 \succ$ аналогічно попередній виділяється фрагмент $\{w_{ci}^1\}_2 \succ$ з кількістю n_{h2} послідовних контейнерів, сумарна вага $\tilde{P}_2$ яких мінімально відрізняється від розрахункового значення P_2 . Виділені контейнери складають підмножину Sr_2 другого вантажного приміщення.

Для формування наступних підмножин контейнерів Sr_j продовжуємо реалізацію процедури, що складається з двох етапів. На першому етапі модифікуємо попередню послідовність $w_{ci}^{k-1} \succ$, виключаючи з неї виділений

фрагмент $\{w_{ci}^{k-1}\}_k \succ$, і отримаємо чергову модифіковану послідовність $w_{ci}^k \succ$, яка на p_{hk-1} контейнерів коротше попередньої.

Другим етапом є виділення з послідовності $w_{ci}^k \succ$ фрагменту $\{w_{ci}^k\}_{k+1} \succ$, який містить p_{hk+1} послідовних контейнерів, сумарна вага $\tilde{P}_{k+1}$ яких мінімально відрізняється від розрахункового значення P_{k+1} . За таким алгоритмом формується $n-1$ підмножин Sr_j . Остання модифікована послідовність $w_{ci}^{n-1} \succ$ містить p_{hn} контейнерів, що залишилися, які і складають останню n -у підмножину Sr_n , причому її вага $\tilde{P}_n$ мінімально відрізняється від P_n .

Слід зазначити, що вибір фрагменту $\{w_{ci}^{k-1}\}_k \succ$ з модифікованої послідовності $w_{ci}^{k-1} \succ$ проводиться методом зміщення вікна. Ширина вікна дорівнює кількості p_{hk} контейнерів у вантажному приміщенні. При початковому положенні у вікно потрапляють члени послідовності від першого до p_{hk} -го, розраховується сумарна вага всіх контейнерів вікна $\hat{P}_k$ та визначається різниця $\Delta P_k = |\hat{P}_k - P_k|$. Потім положення вікна відносно початку послідовності $P_{ci}^{k-1} \succ$ змінюється на одну позицію і визначається різниця ΔP_k . Переміщення вікна по послідовності $P_{ci}^{k-1} \succ$ та визначення різниці ΔP_k проводиться до тих пір, поки у вікно не потрапить останній контейнер послідовності. У якості складу бею $\{w_{ci}^{k-1}\}_k \succ$ приймаються контейнери вікна з мінімальним значенням ΔP_k .

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

Розміщення контейнерів по беям в кожному вантажному приміщенні слід проводити, прагнучи домогтися рівності їх ваг. У цьому випадку центр

ваги частини партії вантажу у вантажному приміщенні близький до центру його об'єму.

Після розміщення контейнерів партії P_j^k по баях для кожного з бей необхідно розподілити контейнери по ярусах, причому розподіл контейнерів по ярусах в баях має забезпечити необхідне збільшення вертикального статичного моменту M_{hj} , створюваного контейнерами партії P_j^k , як показано у виразі (4.9). Якщо партія P_j^k розміщена в m_j баях вантажних приміщень H_j^k , то $M_{hj} = \sum_{i=1}^{m_j} M_{hji}$, де M_{hji} – приріст статичного моменту контейнерами i -го беоу партії.

Очевидно, вибір збільшень моменту M_{hji} по баях доцільно проводити пропорційним вазі $\tilde{P}_i$ контейнерів беоу, тобто $M_{hji} = \frac{\tilde{P}_i}{W_{\Sigma j}} M_{hj}$, де $W_{\Sigma j}$ – сумарна вага контейнерів партії P_j^k . При цьому слід перевірити можливість створення контейнерами беоу збільшення моменту M_{hji} , тобто справедливе співвідношення $M_{hji} \in [\Delta M_{hmini}, \Delta M_{hmaxi}]$, де ΔM_{hmini} та ΔM_{hmaxi} – відповідно мінімальне і максимальне збільшення моменту, які можуть бути створені контейнерами беоу.

Припустимо, що бей складається з s ярусів, в кожному з яких знаходиться по b контейнерів, причому контейнери беоу ранжирувані за зменшенням ваги. Для визначення ΔM_{hmini} і ΔM_{hmaxi} необхідно групу контейнерів беоу розділити на s фрагментів $\tilde{M}n_k^i$ (попередніх ярусів) по b контейнерів в кожному. Причому вага $\tilde{P}u_k^i$ ярусу $\tilde{M}n_k^i$ i -го беоу зменшується зі збільшенням k , так як послідовність контейнерів ранжирувана зменшенням їх ваг. Тому ΔM_{hmaxi} досягається, якщо верхнім ярусом буде найбільший по вазі $\tilde{P}u_1^i$ ярус $\tilde{M}n_1^i$, а нижче розташовуються яруси $\tilde{M}n_k^i$ в порядку

зменшення ваги $\tilde{P}_{y_k}^i$ (на нижньому ярусі розташовується найбільш легкий фрагмент $\tilde{M}_{n_{ck}}^i$). Отже:

$$\Delta M_{hmaxi} = \sum_{k=1}^c [\tilde{P}_{y_k}^i (c - k + \frac{1}{2}) \Delta z],$$

де Δz – відстань по висоті між центрами тяжіння сусідніх ярусів.

Аналогічно, для розрахунку ΔM_{hmini} необхідно змінити порядок розташування фрагментів $\tilde{M}_{n_k}^i$ по ярусам. Найбільший за вагою $\tilde{P}_{y_1}^i$ фрагмент $\tilde{M}_{n_1}^i$ займає нижній ярус, а по спадаючій вазі фрагменту висота ярусу зростає, так, що найбільш легкий фрагмент $\tilde{M}_{n_{ck}}^i$ розміщується на верхньому ярусі. Отже:

$$\Delta M_{hmini} = \sum_{k=1}^c [\tilde{P}_{y_k}^i (k - \frac{1}{2}) \Delta z].$$

Якщо умова $M_{hji} \in [\Delta M_{hmini}, \Delta M_{hmaxi}]$ виконується, то виконуємо розподіл контейнерів бею по ярусах, домагаючись формування приросту M_{hji} .

Для цього слід визначити необхідну (теоретичну) вагу контейнерів k -го ярусу $\bar{P}_{y_k}^i$, враховуючи, що зі зміною ярусу він також змінюється пропорційно збільшенню ваги ΔP_{hi} відносно середньої ваги ярусу в беї $P_{mi} = \frac{\tilde{P}_i}{c}$. При цьому розподіл ваги контейнерів по ярусах визначається однією з наступних процедур в залежності від характеру зміни ваги ярусу.

За допомогою першої процедури вага ярусу зменшується зі збільшенням його номеру (від низу до верху), тобто нижній ярус має найбільшу вагу, а верхній є найбільш легким. В цьому випадку, вважаючи, що вага середнього ярусу дорівнює P_{mi} , отримаємо:

$$\bar{P}y_k^i = P_{mi} + (S_k - k)\Delta P_{hi},$$

де $S_k = \text{Trunc}(c/2) + 1$, при c – непарному та $S_k = c/2$, при c – парному.

Кожен ярус створює момент, причому сума моментів повинна дорівнювати приросту M_{hji} . Тому величину ΔP_{hi} знаходимо із співвідношення:

$$\sum_{k=1}^c \{ [P_{mi} + (S_k - k)\Delta P_{hi}] (k - 0,5) \Delta z \} = M_{hji} \text{ або}$$

$$P_{mi} \Delta z \sum_{k=1}^c (k - 0,5) + \Delta P_{hi} \Delta z \sum_{k=1}^c (S_k - k)(k - 0,5) = M_{hji}.$$

Із останнього рівняння:

$$\Delta P_{hi} = \frac{M_{hji} - P_{mi} \Delta z \sum_{k=1}^c (k - 0,5)}{\Delta z \sum_{k=1}^c (S_k - k)(k - 0,5)}. \quad (4.14)$$

Друга процедура формує бей, вага ярусів якого збільшується зі збільшенням його номера. Сумарна вага контейнерів k -го ярусу $\bar{P}y_k^i$ визначається виразом:

$$\bar{P}y_k^i = P_{mi} - (S_k - k)\Delta P_{hi},$$

В якому значення ΔP_{hi} визначається виразом (4.14).

Третя процедура передбачає формування ярусів, коли вага середнього ярусу є максимальною, а з віддаленням від нього вага ярусу зменшується. Вага у непарному ярусі, змінюється у відповідності з виразом:

$$\bar{P}y_k^i = P_{mi} + A\Delta P_{hi} - |S_k - k|\Delta m\Delta P_{hi},$$

де $\Delta m = \frac{c}{\Phi} A$, причому $\Phi = 2 \sum_{i=1}^{\frac{c-1}{2}} i$, а ціле значення A задається.

Так, наприклад, при $A = 6$ значення $\Delta m = 5$.

В цьому випадку ΔP_{hi} розраховується за допомогою виразу:

$$\Delta P_{hi} = \frac{M_{hji} - \Delta z (P_{mi} + A \Delta P_{hi}) \sum_{k=1}^{ck} (k - 0,5)}{\Delta z \sum_{k=1}^{ck} \{|S_k - k|(k - 0,5)\} \Delta m}. \quad (4.15)$$

За допомогою четвертої процедури проводиться формування ярусів таким чином, що вага середнього ярусу є мінімальною, а з віддаленням від нього вага ярусу збільшується. Причому її величина, у непарному, розраховується за формулою:

$$\bar{P}_{y_k^i} = P_{mi} - A \Delta P_{hi} + |S_k - k| \Delta m \Delta P_{hi},$$

де ΔP_{hi} визначається формулою (4.15).

Таким чином, вагу контейнерів можна розподілити по висоті різними способами, кожен з яких забезпечує формування заданого приросту M_{hji} .

Маючи в своєму розпорядженні теоретичні ваги кожного ярусу $\bar{P}_{y_k^i}$ і-го бею, які розраховані однією з чотирьох процедур, необхідно підібрати на кожен ярус b контейнери, сумарна вага яких $\hat{P}_{y_k^i}$ мінімально відрізняється від величини $\bar{P}_{y_k^i}$.

Формування ярусів вагою $\bar{P}_{y_k^i}$ і-го бею виконується аналогічно формуванню беїв методом переміщеного вікна, тільки в якості вихідної застосовується послідовність контейнерів бею, а ширина вікна дорівнює числу b контейнерів в ярусі. В результаті підмножина S_{p_i} контейнерів і-го

бею розділяється на s підмножини Sp_{ik} ярусів, кожне з яких містить b контейнерів.

Потім контейнери підмножин Sp_{ik} розміщуються по відділах поперечного ряду i -го бею k -го ярусу (рядок тензора) так, щоб ваги контейнерів ярусу P_{cik} створювали мінімальний момент M_{yik} :

$$M_{yik} = \sum_{j=1}^b P_{cik} \left(\frac{2j-1}{2} - \frac{b}{2} \right) \Delta y,$$

де Δy – горизонтальна відстань між центрами контейнерів в ярусі.

Причому мінімізація сумарного моменту M_y при розміщенні контейнерів підмножини Sp_{ik} проводиться шляхом врахування його значення, який накопичився при розміщенні контейнерів у всіх попередніх ярусах, включаючи вже сформовані беї.

4.5 Висновки за четвертим розділом

У четвертому розділі наведена постановка задачі розробки методу формування безпечного завантаження контейнеровозу в загальному вигляді. Сформульовано основні етапи наукового дослідження.

Розглянуті питання обліку доступності партій контейнерів, які вивантажуються, при формуванні укрупненого тензору завантаження судна. Отримано умови доступності партій, які вивантажуються, і запропоновані процедури реалізації цих умов.

Сформульовано вимоги морехідної безпеки судна при розміщенні партій контейнерів завантаження, які формалізовані у вигляді аналітичних виразів. Отримано залежності параметрів посадки і остійності судна від статичних моментів його завантаження, що дозволяють сформувати припустиму множину розміщення контейнерів по вантажним приміщенням судна.

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

РОЗДІЛ 5. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАВАНТАЖЕННЯ СУДНА

5.1 Залежність сил інерції хитавиці від завантаження судна

Слідуючи роботі [94], досліджено вплив осьового моменту інерції судна щодо поздовжньої вісі на величину сил інерції хитавиці.

Розглянуто випадок, коли апліката центру ваги судна з завантаженим приміщенням збігається з аплікатою геометричного центру вантажного приміщення. У цьому випадку радіус-вектор R_h положення кожного контейнеру відносно поздовжньої вісі, що проходить через геометричний центр вантажного приміщення, дорівнює радіусу-вектору R_v положення кожного контейнеру відносно поздовжньої вісі, що проходить через центр ваги судна, тобто $R_v = R_h$. Сила інерції від бортової хитавиці F_θ , діюча на контейнер, залежить від маси контейнеру і лінійного прискорення j_θ , а модуль її максимального значення визначається виразом:

$$F_{\theta_{\max}} = m_c j_{\theta_{\max}}.$$

Очевидно, $j_{\theta_{\max}} = R_v \ddot{\theta}_{\max}$, де $\ddot{\theta}_{\max}$ – максимальне значення кутового прискорення. У третьому розділі отримали вираз для кутового прискорення:

$$\ddot{\theta} = -\theta_o \omega_k^2 \sin(\omega_k t - \psi),$$

звідки $\ddot{\theta}_{\max} = \theta_o \omega_k^2$ і, тому:

$$F_{\theta_{\max}} = m_c R_h \theta_o \omega_k^2.$$

В третьому розділі отримали $\theta_o = \frac{\chi_\theta \omega_o^2}{[(\omega_o^2 - \omega_k^2)^2 + 4h^2 \omega_k^2]^{1/2}},$

$\omega_o^2 = \frac{Dh_o}{(J_x + m_x)}$ и $h = \frac{\mu_x}{2(J_x + m_x)}$. Тому, ввівши значення $A = m_c R_h \omega_k^2 \chi_\theta B,$

$B = Dh_o$, отримаємо:

$$F_{\theta_{mx}} = \frac{A}{(J_x + m_x)[(\omega_o^2 - \omega_k^2)^2 + 4h^2 \omega_k^2]^{1/2}} =$$

$$= \frac{A}{(J_x + m_x) \left\{ \left(\frac{B}{(J_x + m_x)} - \omega_k^2 \right)^2 + 4 \left[\frac{\mu_x}{2(J_x + m_x)} \right]^2 \omega_k^2 \right\}^{1/2}}, \text{ або}$$

$$F_{\theta_{mx}} = \frac{A}{\{ [B - (J_x + m_x) \omega_k^2]^2 + \mu_x^2 \omega_k^2 \}^{1/2}}.$$

Враховуючи, що $\bar{J}_x = J_x + m_x$ – момент інерції судна з узагальненими приєднаними масами води відносно поздовжньої вісі X-X, вираз для максимальної сили інерції в залежності від моменту інерції $\bar{J}_x$ набуває вигляду:

$$F_{\theta_{mx}} = \frac{A}{\{ [B - \bar{J}_x \omega_k^2]^2 + \mu_x^2 \omega_k^2 \}^{1/2}}. \quad (3.8)$$

В свою чергу, момент інерції $\bar{J}_x$ є сумою моментів інерції судна з запасами $\bar{J}_{xv}$ і 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 вісі, що проходить через центр ваги судна, і залежне від положення вантажного приміщення щодо цієї вісі.

Доцільно проводити розрахунок моменту інерції вантажу $\bar{J}_{xc}^h$ відносно поздовжньої вісі, що проходить через геометричний центр вантажного

приміщення, а потім знаходити його зв'язок з моментом інерції вантажу $\bar{J}_{xc}$.

Знайдемо вираз для розрахунку $\bar{J}_{xc}^h$:

$$\bar{J}_{xc}^h = \sum_{i=1}^{Nc} m_i R_{hi}^2,$$

де m_i – маса i -го вантажу, $R_{hi}^2 = y_j^2 + z_k^2$;

y_j та z_k – координати центру мас контейнеру відносно поздовжньої вісі трюму, причому $y_j = (\frac{2j-1}{2} - \frac{b}{2})\Delta y$, $z_k = \frac{2k-1}{2}\Delta z - \frac{h}{2}$. В цьому випадку h – висота вантажного приміщення.

Момент інерції вантажу $\bar{J}_{xc}$ відносно поздовжньої вісі, що проходить через центр ваги судна, розраховується, виходячи з того, що радіус-вектор R_{vi} має складові: поперечну рівну y_j і вертикальну, що є сумою $z_k + \Delta Z$ (рис. 5.1). Тому $R_{vi}^2 = y_j^2 + (z_k + \Delta Z)^2$ та момент $\bar{J}_{xc}$:

$$\bar{J}_{xc} = \sum_{i=1}^{Nc} m_i R_{vi}^2 = \sum_{i=1}^{Nc} m_i [y_j^2 + (z_k + \Delta Z)^2], \text{ або}$$

$$\bar{J}_{xc} = \bar{J}_{xc}^h + \sum_{i=1}^{Nc} m_i [2\Delta Z z_i + \Delta Z^2] = \bar{J}_{xc}^h + 2\Delta Z \sum_{i=1}^{Nc} m_i z_i + \Delta Z^2 M_c,$$

де M_c – сумарна маса всіх контейнерів партії.

З урахуванням отриманого виразу момент інерції судна $\bar{J}_x$:

$$\bar{J}_x = \bar{J}_{xv} + \bar{J}_{xc} = \bar{J}_{xv} + \Delta Z^2 M_c + \bar{J}_{xc}^h + 2\Delta Z \sum_{i=1}^{Nc} m_i z_i,$$

який містить постійну складову $Q_c = \bar{J}_{xv} + \Delta Z^2 M_c$ і складову

$Q_p = \bar{J}_{xc}^h + 2\Delta Z \sum_{i=1}^{Nc} m_i z_i$, що залежить від порядку укладання контейнерів в

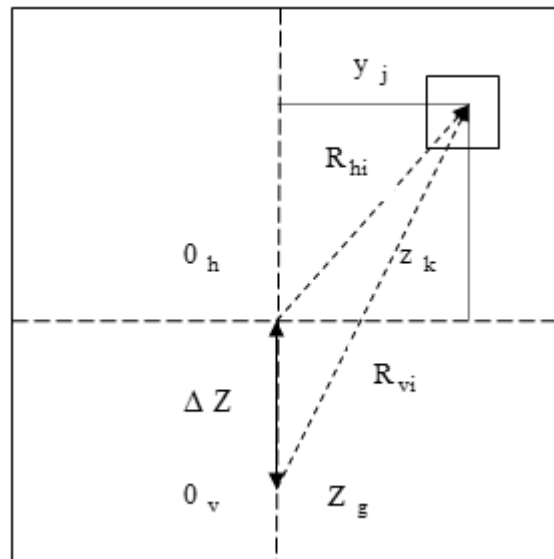


Рисунок 5.1 – Залежність моментів інерції $\bar{J}_{xc}^h$ та $\bar{J}_{xc}$

беях по ярусах і в ярусах. Так як 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 обрати максимальне Q_{pmx} та мінімальне Q_{pmn} значення і з їх допомогою розраховуються екстремальні значення моменту інерції судна $\bar{J}_{xmx} = Q_c + Q_{pmx}$ та $\bar{J}_{xmn} = Q_c + Q_{pmn}$.

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

Визначення допустимості виникаючої сили інерції полягає у виборі контейнеру 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.

Наведемо приклад з роботи [94] для судна, яке характеризується водотоннажністю порожнім з урахуванням запасів, рівним 14360 т і

моментом інерції для даного стану $\bar{J}_{xy} = 194317 \text{ тм}^2$. Постійна складова осьового моменту інерції судна дорівнює $Q_c = 205573,08 \text{ тм}^2$ і змінна складова $Q_{pk} = \bar{J}_{xck}^h + 12,14 \sum_{i=1}^{N_c} m_i z_i$, де $\bar{J}_{xck}^h$ – момент інерції вантажу відносно поздовжньої вісі, що проходить через геометричний центр вантажного приміщення, який залежить від k-го способу укладання контейнерів в беї. За допомогою розробленої комп'ютерної програми були розраховані значення величин $\bar{J}_{xck}^h$ та Q_{pk} для всіх восьми варіантів укладання, причому кожна пара варіантів відповідає одній з чотирьох процедур формування ярусів, для непарних варіантів укладання контейнерів в ярусі в порядку убутання ваги від центру трюму до бортів, а для парних варіантів – навпаки.

В таблиці 5.1 наведені значення $\bar{J}_{xck}^h$, Q_{pk} и $\bar{J}_{xk}$, G_k ($k=1\dots 8$).

Для розрахунку величини G_k враховуємо, що $B = Dh_o$. Так як $D = 14360 \text{ т}$, $h_o \approx 1,3 \text{ м}$, то $B = 18668$. Період хитавиці приймаємо рівним 17 с , тому величини $\omega_k = 0,3694 \text{ с}^{-1}$. Отже, $G_k = (18668 - \bar{J}_{xk} 0,1365)^2$.

Таблиця 5.1 – Результати розрахунку варіантів розміщення контейнерів

Вар.	Процед.	Ряд	$\bar{J}_{xck}^h$	Q_{pk}	$\bar{J}_{xk}$	G_k	Прим.
1	1	< >	38333	37883	243456	212102639	мінім.
2	1	> <	55169	54718	260255	284151959	
3	2	< >	38254	38804	244377	215780249	
4	2	> <	54812	55362	260935	287289872	
5	3	< >	38307	38552	244125	214770856	
6	3	> <	55204	55449	261022	287692584	макс.
7	4	< >	38132	37918	243491	212241818	
8	4	> <	55191	54977	260550	285511143	

Як впливає з таблиці 5.1, мінімальне значення показника G_k відповідає першому варіанту завантаження, а максимальне – шостому варіанту.

Для кожного варіанту розміщення вантажу розраховувалася максимальна сила інерції $F_{\theta_{mx}}$, діюча на контейнер під час бортової хитавиці, приймаючи значення коефіцієнту демпфірування $\mu_x = 1139 \text{ тм}^2/\text{с}$. Середнє значення періоду власних коливань судна становить близько 32 с.

На рисунку 5.2 показано дію сил інерції на контейнери за першим варіантом їх розміщення. Для кожного варіанту розміщення вантажу розраховувалася максимальна сила інерції $F_{\theta_{mx}}$, діюча на контейнер під час бортової хитавиці, приймаючи значення коефіцієнту демпфірування $\mu_x = 1139 \text{ тм}^2/\text{с}$. Середнє значення періоду власних коливань судна становить близько 32 с.

Максимальна сила інерції, що дорівнює $4,81 \text{ тм}/\text{с}^2$, діє на контейнер першого бею на початку нижнього ярусу.

У разі створення мінімального моменту інерції прийнятого вантажу J_{xc} відносно поздовжньої вісі X-X розміщення контейнерів підмножини Sp_{ik} слід проводити так, щоб контейнери з великими масами знаходилися ближче до центру трюму, а зі зменшенням мас розміщення контейнерів вироблялося ближче до бортів.

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

5.2 Окремий випадок завантаження судна контейнерами

Розглянемо випадок перевезення однієї партії контейнерів максимальної ваги з одного порту в інший. Передбачається, що берегова партія більше вантажопідйомності судна і з неї необхідно сформувати вантажну партію Mn_{Nc1} , вага якої максимально близька до вантажопідйомності судна і не

перевищує її. Також робиться припущення про те, що вантажоодержувач один.



Рисунок 5.2 – Індикація сил інерції при першому варіанті завантаження

Судно характеризується середньою вагою контейнеру $P_m^{(v)} = \frac{W_v}{N_v}$, де W_v

– вантажопідйомність судна, N_v – кількість контейнерних місць судна. З берегової партії вибирається вантажна партія Mn_{Nc1} наступним чином.

Спочатку, як показано в четвертому розділі, здійснюється ранжування вихідної берегової партії контейнерів за ознакою зменшення її ваги, тобто перший контейнер є найважчим, а останній – найлегшим. Потім за допомогою методу переміщеного вікна, довжина якого дорівнює N_v ,

обирається партія контейнерів, вагою максимально близькою до вантажопідйомності судна, але не перевершує її. У разі, коли число контейнерів однакове або менше N_v , то для оцінки можливості завантаження судна партією необхідно розрахувати середню вагу контейнеру партії $P_m^{(c)} = \frac{W_c}{N_c}$, де W_c – вага партії, N_c – кількість контейнерів в партії ($N_c \leq N_v$).

У випадку, якщо $N_c = N_v$ та $P_m^{(c)} > P_m^{(v)}$, то завантаження партії неможливе через обмеження вантажопідйомності судна. Якщо ж $N_c < N_v$ і $W_c > W_v$, то завантажити партію неможливо.

Приріст статичних моментів ΔM_x , ΔM_y та ΔM_z , які виникають в результаті прийому партії вантажу, виражаються наступними рівностями:

$$\Delta M_x = \sum_{i=1}^n G_i X_i;$$

$$\Delta M_y = \sum_{i=1}^n G_i Y_i;$$

$$\Delta M_z = \sum_{i=1}^n G_i Z_i;$$

$$\sum_{i=1}^n G_i = W_c,$$

де n – кількість вантажних приміщень;

G_i – вага вантажу в i -му приміщенні;

X_i , Y_i та Z_i – координати центру ваги i -го приміщення.

Забезпечення морехідної безпеки вимагає збільшення статичних моментів ΔM_x , ΔM_y та ΔM_z , які повинні відповідати таким вимогам:

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

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

Процедура оцінки моментів ΔM_d та ΔM_h розглянута в попередньому розділі, з урахуванням того, що в результаті завантаження контейнерів диферент судна d повинен знаходитись в межах від 0 до $-2,0$ м. Причому із зазначеного інтервалу обирається диферент, якому відповідало би розташування контейнерів, яке задовольняє вимогам поздовжньої міцності. Це визначає необхідність знайти граничні значення моменту $M_{X(0)}$ і $M_{X(-2)}$, які забезпечують диферент судна 0 та $-2,0$ м.

Для розміщення партії вантажу по вантажних приміщеннях судна, при якому створюється заданий диферентуючий момент $M_d \in \Delta M_d$, має виконуватись рівність $\Delta M_x = M_d$, а розподіл ваги партії контейнерів з вантажних приміщень слід задовольняти рівнянням:

$$\sum_{i=1}^n G_i = W_c,$$

$$\sum_{i=1}^n G_i X_i = M_d.$$

Далі необхідно провести перевірку можливості забезпечити приріст моменту M_d вагою контейнерів прийнятої партії без баласту. Для цього використовується раніше приведене ранжування контейнерів партії, яка представлена великою кількістю Mn_{Nc} , в послідовності убуття їх ваги, тобто елементи множини Mn_{Nc} упорядковуються за ознакою ваги. Множина Mn_{Nc} представляється послідовністю ваг контейнерів $P_{ci} \succ$, причому $P_{ci} \geq P_{ci+1}$, 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 розглядаємо як множини Mn_{Nc} .

Для створення максимально можливого збільшення моменту, позначене $\Delta M_{\text{хмх}}$, як і в четвертому розділі, слід розбити послідовність $P_{ci} \succ = \{P_{c1} \geq P_{c2} \geq \dots \geq P_{cd-1} \geq P_{cd}\}$ на n (кількість вантажних приміщень судна) послідовних непересічних підмножин $\tilde{S}p_i$ ($i=1\dots n$), кожне з яких містить n_{hi} , яке дорівнює кількості теоретичних місць (відділів) вантажного приміщення, упорядкованих за вагою контейнерів. Позначаючи через P_i вагу контейнерів підмножини $\tilde{S}p_i$, отримаємо $P_1 \geq P_2 \geq \dots \geq P_n$. Якщо підмножини $\tilde{S}p_i$ контейнерів з вагою P_i розмістити по відповідним вантажним приміщенням, починаючи з корми в ніс по спадаючій величини P_i , то буде досягнуто максимального збільшення статичного моменту $\Delta M_{\text{хмх}}$, що викликає диферент судна.

Якщо має місце нерівність $|\Delta M_{\text{хмх}}| \geq |M_d|$, то це означає, що існує підмножина допустимих завантажень судна без прийому баласту.

Розглянемо процедуру формування розподілу ваг партії контейнерів по вантажним приміщенням судна. Звертаємо увагу на таку обставину.

Створюваний i -м вантажним приміщенням приріст заданого диферентуючого моменту виражається у формі:

$$M_{di} = \{P_{cp} + \frac{X_i}{L} \Delta P\} X_i,$$

Або для всіх вантажних приміщень:

$$\sum_{i=1}^n \{P_{cp} + \frac{X_i}{L} \Delta P\} X_i = \sum_{i=1}^n M_{di} = M_d,$$

звідки

$$\sum_{i=1}^n P_{cp} X_i + \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{L} \Delta P X_i = M_d, \text{ або}$$

$$\frac{\Delta P}{L} \sum_{i=1}^n X_i^2 = M_d - \sum_{i=1}^n P_{cp} X_i, \text{ отже}$$

$$\Delta P = \frac{L(M_d - \sum_{i=1}^n P_{cp} X_i)}{\sum_{i=1}^n X_i^2}.$$

Тому кількість вантажу в i -му приміщенні визначається за допомогою виразу:

$$P_i = P_{cp} + \frac{X_i}{L} \Delta P,$$

або з урахуванням отриманого виразу для розрахунку ΔP :

$$P_i = P_{cp} + \frac{X_i}{L} \left[\frac{L(M_d - \sum_{i=1}^n P_{cp} X_i)}{\sum_{i=1}^n X_i^2} \right], \text{ або}$$

$$P_i = P_{cp} + \frac{X_i}{\sum_{i=1}^n X_i^2} (M_d - \sum_{i=1}^n P_{cp} X_i).$$

Підсумовуючи по всім вантажним приміщенням судна, отримаємо:

$$\sum_{i=1}^n \left\{ P_{cp} + \frac{X_i}{\sum_{i=1}^n X_i^2} (M_d - \sum_{i=1}^n P_{cp} X_i) \right\} =$$

$$nP_{cp} + \frac{1}{\sum_{i=1}^n X_i^2} \left\{ \sum_{i=1}^n [X_i (M_d - P_{cp} \sum_{i=1}^n X_i)] \right\} =$$

$$nP_{cp} + \frac{1}{\sum_{i=1}^n X_i^2} \left\{ M_d \sum_{i=1}^n X_i - P_{cp} \sum_{i=1}^n X_i \left(\sum_{i=1}^n X_i \right) \right\} =$$

$$nP_{cp} + \frac{1}{\sum_{i=1}^n X_i^2} \{M_d \sum_{i=1}^n X_i - P_{cp} (\sum_{i=1}^n X_i)^2\} = W_c.$$

Якщо позначити $A = \sum_{i=1}^n X_i$ і $B = \sum_{i=1}^n X_i^2$, то отримаємо:

$$nP_{cp} + \frac{1}{B} \{M_d A - P_{cp} A^2\} = W_c. \quad (5.1)$$

З останнього виразу знаходимо:

$$P_{cp} (n - \frac{A^2}{B}) = W_c - \frac{A}{B} M_d,$$

звідки

$$P_{cp} = \frac{W_c - \frac{A}{B} M_d}{n - \frac{A^2}{B}}.$$

Підставляючи останній вираз для P_{cp} в (5.1), переконуємося в правильності співвідношення:

$$n \left[\frac{W_c - \frac{A}{B} M_d}{n - \frac{A^2}{B}} \right] + \frac{1}{B} \{M_d A - \left[\frac{W_c - \frac{A}{B} M_d}{n - \frac{A^2}{B}} \right] A^2\} = W_c.$$

Дійсно,

$$n \left[\frac{W_c - \frac{A}{B} M_d}{n - \frac{A^2}{B}} \right] + \frac{1}{B} \{M_d A - \left[\frac{W_c - \frac{A}{B} M_d}{n - \frac{A^2}{B}} \right] A^2\} = \frac{n}{n - \frac{A^2}{B}} (W_c - \frac{A}{B} M_d) +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{B(n - \frac{A^2}{B})} [A(n - \frac{A^2}{B})M_d - (W_c - \frac{A}{B}M_d)A^2] = \\
& \frac{1}{n - \frac{A^2}{B}} [nW_c - n\frac{A}{B}M_d + \frac{1}{B}(n - \frac{A^2}{B})M_dA - \frac{1}{B}(W_c - \frac{A}{B}M_d)A^2] = \\
& \frac{1}{n - \frac{A^2}{B}} \{ (n - \frac{A^2}{B})W_c + [\frac{A^3}{B^2} + \frac{A}{B}(n - \frac{A^2}{B}) - n\frac{A}{B}]M_d \} = \\
& W_c + \frac{1}{n - \frac{A^2}{B}} (\frac{A^3}{B^2} + n\frac{A}{B} - \frac{A^3}{B^2} - n\frac{A}{B})M_d = W_c,
\end{aligned}$$

що і треба було довести.

Очевидно, сумарний момент $M_{\Sigma X}$ по всім вантажним приміщенням:

$$M_{\Sigma X} = \sum_{i=1}^n \{ P_{cp} + \frac{X_i}{\sum_{i=1}^n X_i^2} (M_d - \sum_{i=1}^n P_{cp} X_i) \} X_i = M_d.$$

Переконуємося в цьому:

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^n \{ P_{cp} + \frac{X_i}{\sum_{i=1}^n X_i^2} (M_d - \sum_{i=1}^n P_{cp} X_i) \} X_i = \\
& P_{cp} \sum_{i=1}^n X_i + \frac{M_d}{B} \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{P_{cp}A}{B} \sum_{i=1}^n X_i^2 = P_{cp}A + \frac{M_d}{B}B - \frac{P_{cp}A}{B}B = M_d.
\end{aligned}$$

Надалі множину Mn_{Np} партії контейнерів з вагою P_{cj} необхідно розмістити по вантажним приміщенням судна, враховуючи, що число контейнерів кожного вантажного приміщення дорівнює числу його відділів,

таким чином, щоб сумарна вага контейнерів кожного вантажного приміщення була максимально близькою до отриманого значення P_i .

Для вирішення поставленого завдання використовується процедура, яка була розглянута в четвертому розділі. Процедура складається з двох етапів. На першому етапі модифікується попередня послідовність P_{ci}^{k-1} виключаючи з неї виділений фрагмент $\{Pk_{ci}^{k-1}\}_k$, отримуючи чергову модифіковану послідовність P_{ci}^k , яка на n_{hk-1} контейнерів коротше за попередню.

Другим етапом є виділення з послідовності P_{ci}^k фрагменту $\{Pk_{ci}^k\}_{k+1}$, що містить n_{hk+1} послідовних контейнерів, сумарна вага $\tilde{P}_{k+1}$ яких мінімально відрізняється від розрахункового значення P_{k+1} . Завдяки такому алгоритму формується $n-1$ підмножин Sr_i . Остання модифікована послідовність P_{ci}^{n-1} містить n_{hn} контейнерів, які залишилися та є останньою n -ою підмножиною Sr_n , причому її вага $\tilde{P}_n$ мінімально відрізняється від P_n .

Слід зазначити, що вибір фрагменту $\{Pk_{ci}^{k-1}\}_k$ з модифікованої послідовності P_{ci}^{k-1} проводиться методом переміщеного вікна. Ширина вікна дорівнює числу n_{hk} контейнерів у вантажному приміщенні. При початковому положенні у 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 відносно 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 у вікно не потрапить останній контейнер послідовності. В якості складу бею $\{Pk_{ci}^{k-1}\}_k$ приймаються контейнери вікна з мінімальним значенням ΔP_k .

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

У вантажних приміщеннях розподіл обраних контейнерів партії по беям слід проводити рівномірно з тим, щоб центр ваги вантажу збігався з центром вантажного приміщення.

Розподіл ваги бею по ярусах проводиться за принципом зменшення ваги ярусу зі збільшенням його номеру з урахуванням створення розрахованого збільшення статистичного вертикального моменту, який є необхідним для забезпечення остійності судна.

У кожному ярусі контейнери розташовані в порядку зменшення їх ваги від центру ярусу до його країв. Це необхідно для створення мінімального моменту інерції судна відносно його поздовжньої вісі, що зменшує сили інерції, які діють на контейнери в умовах хитавиці судна.

Таким чином проводиться розміщення контейнерів партії по вантажним приміщенням, беям і ярусам для дотримання вимог морехідної безпеки судна.

5.3 Імітаційне моделювання завантаження судна «Скай Джемені»

Розглянемо формування завантаження судна «Скай Джемені», яке може приймати контейнери у вісім трюмів та на їх кришки. Розміщення контейнерів може проводитися в 16 вантажних приміщень ($1 \div 8$ трюму і $9 \div 16$ кришки трюмів). У кожному з вантажних приміщень можна розмістити 192 двадцяти футових контейнери (чотири бея по шість ярусів, кожен з яких містить вісім контейнерів). Судно характеризується максимальною середньою 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 5.2.

Таблиця 5.2 – Характеристики партій контейнерів

Партія	P_1^5	P_1^4	P_1^2	P_3^4
N контейнерів	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 5.3.

Таблиця 5.3 – 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
N контейнерів	3072	2520	2808	1920
Вага завантаж.	45000	37800	41850	28800

В результаті кожного завантаження партій контейнерів диферент судна d повинен знаходитись в межах від 0 до $-2,0$ м. З вказаного інтервалу обирається диферент, якому відповідало би розміщення контейнерів, що задовольняє вимогам поздовжньої міцності. Тому для кожної партії вантажу необхідно знайти граничні значення статичного моменту $M_{X(0)}$ та $M_{X(-2)}$, які забезпечують диферент судна відповідно 0 і $-2,0$ м. Для цього скористаємося залежністю, наведеною в розділі 4:

$$M_{Xc} = Dx_c + d\bar{M} - \Delta M_X,$$

де x_c – абсциса центру величини, яка відповідає водовміщенню D ;

$\overline{M}$ – момент, диферентуючий судно на один сантиметр.

В даному випадку завантаження судна можна формувати без прийому баласту, тому ΔM_x є постійною величиною, яка для даного судна $\Delta M_x = -99227$.

Тому для i -го завантаження:

$$M_{xc(0)}^{(i)} = D_i x_{ci} - \Delta M_x - M_{xc(0)}^{(i-1)} ;$$

$$M_{xc(-2)}^{(i)} = D_i x_{ci} - 200 \overline{M}_i - \Delta M_x - M_{xc(-2)}^{(i-1)}.$$

Аналогічно визначається граничне значення статичного моменту M_{Zci^*} , створюваного партіями контейнерів завантаження, при якому метацентрична висота дорівнює мінімальному значенню 0,15 м. У четвертому розділі показано:

$$M_{Zci^*} = D_i (Z_{mi} - 0,15) - \Delta M_z.$$

В даному випадку ΔM_z постійною величиною і для розглянутого судна $\Delta M_z = 122165$. При розрахунку водотоннажності крім ваги вантажу враховується вага судна порожнього, вага запасів і палива, що в сумі становить 14360 т.

У таблиці 5.4 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 з гідростатиці судна «Скай Джемені».

Таблиця 5.4 – 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 при першому завантаженні розміщуються партії P_1^4 та P_1^2 .

В даному підрозділі представлені результати імітаційного моделювання чотирьох завантажень судна. 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 хитавицею судна під час переходу досягнута порядком укладання контейнерів в кожному ярусі: контейнери з більшою масою розташовуються ближче до діаметральної площини судна.

В таблиці 5.5 наведено розподіл партій контейнерів першого завантаження по вантажних приміщеннях судна.

Таблиця 5.5 – Розподіл контейнерів першого завантаження по вантажних приміщеннях

Партія	1 (P_1^5)	2 (P_1^4)	3 (P_1^2)	Σ
Приміщення				
1		192		192
2	192			192
3	192			192
4	192			192
5	192			192
6	192			192
7	192			192
8		192		192
9			192	192
10		24	168	192
11	192			192
12	192			192
13	192			192
14		192		192
15	192			192
16			192	192
Σ	1920	600	552	3072

На рисунку 5.3 показаний початковий інтерфейс імітаційної комп'ютерної програми. Для моделювання першого завантаження партій контейнерів потрібно скористатися клавішею «Party», при цьому, як показано на рисунку 5.4, в його верхній частині схематично показані приміщення, в яких розміщуються контейнери першого завантаження судна. Далі слід використовувати клавішу «Show», в результаті чого виводиться докладне зображення розміщення контейнерів у вантажних приміщеннях.

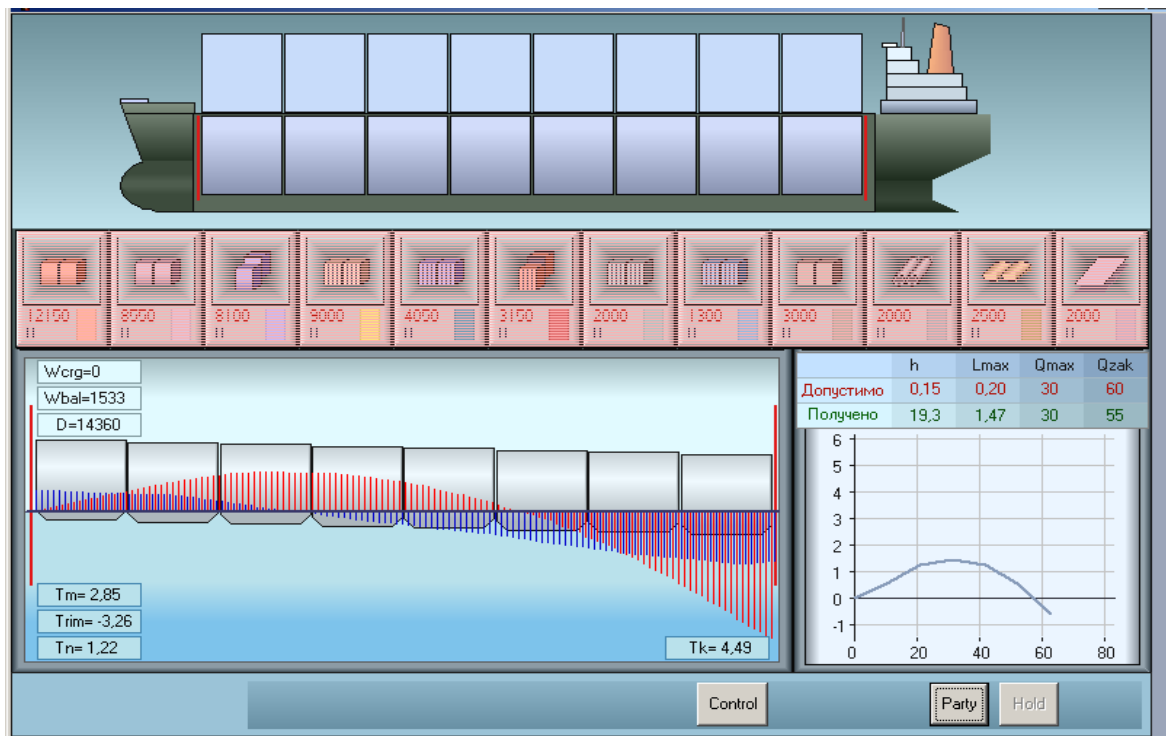


Рисунок 5.3 – Судно перед завантаженням



Рисунок 5.4 – Схема розміщення першого завантаження на судні

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 морехідної безпеки судна, які відображаються у вигляді діаграми статичної остійності, епюр перерізуючих сил і згинальних моментів, як показано на рисунку 5.5. для першого завантаження судна.

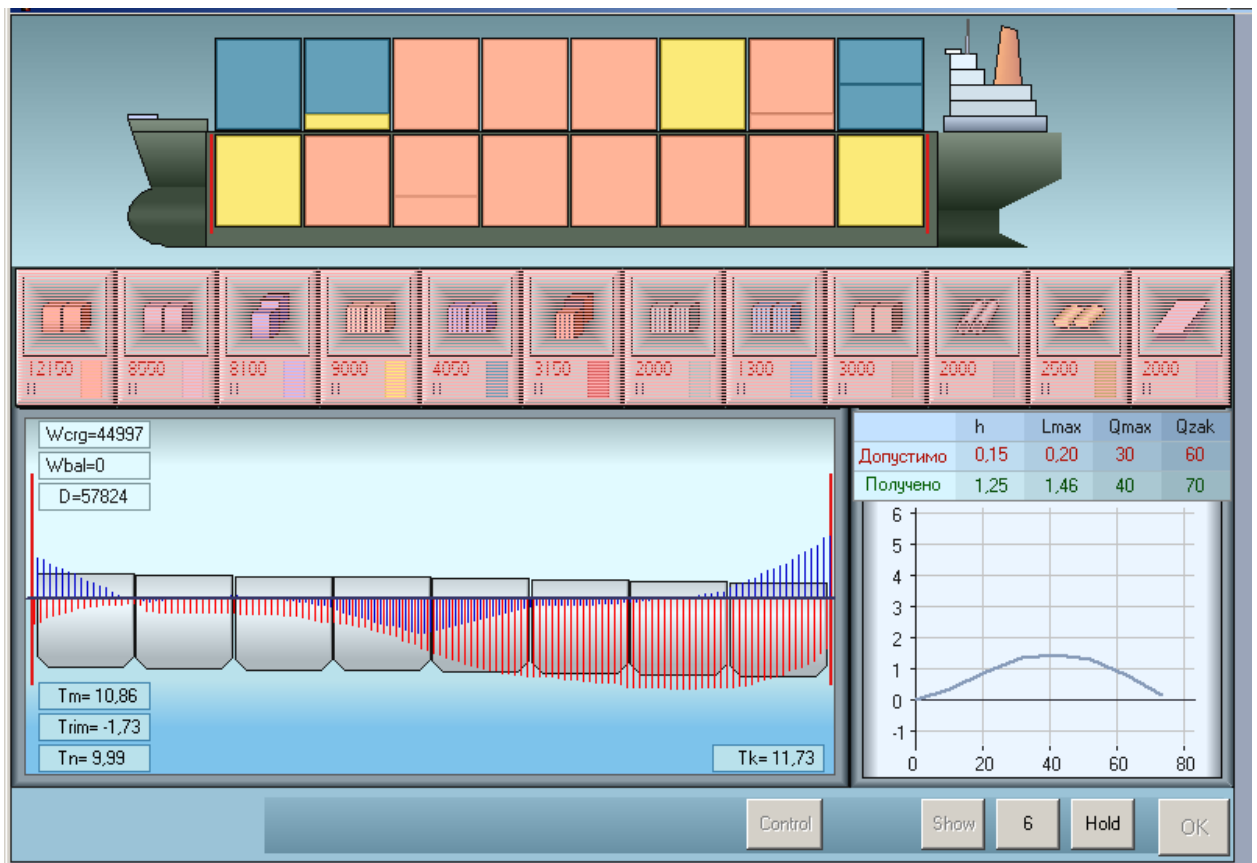


Рисунок 5.5 – Характеристики морехідної безпеки першого завантаження

У другому порті проводиться вивантаження партії контейнерів P_1^2 , тому друге завантаження судна визначається партіями P_1^4 та P_1^5 , розподіл яких по вантажним приміщенням судна показано в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Розподіл контейнерів другого завантаження по вантажним приміщенням

Партія	1 (P_1^5)	2 (P_1^4)	Σ
Приміщення			
1		192	192
2	192		192
3	192		192
4	192		192
5	192		192
6	192		192
7	192		192
8		192	192
9			
10		24	24
11	192		192
12	192		192
13	192		192
14		192	192
15	192		192
16			
Σ	1920	600	2520

Схема розміщення другого завантаження на судні показана на рисунку 5.6, причому партія контейнерів P_1^4 зображена жовтим кольором, а партія P_1^5 – помаранчевим кольором.

На рисунку 5.7 схематично показано докладне зображення розміщення контейнерів у вантажних приміщеннях, причому у верхній частині рисунка зображено розміщення контейнерів на кришках трюмів, а нижче показано розташування контейнерів в трюмах судна. На нижній частині рисунка

представлений вид зверху на вміст трюмів. З рисунку видно, що при другому завантаженні судна в носовому і кормовому трюмах знаходяться контейнери другої партії P_1^4 , які зображені жовтим кольором, а решта трюму завантажені контейнерами першої партії P_1^5 (помаранчевий колір). На палубі контейнери

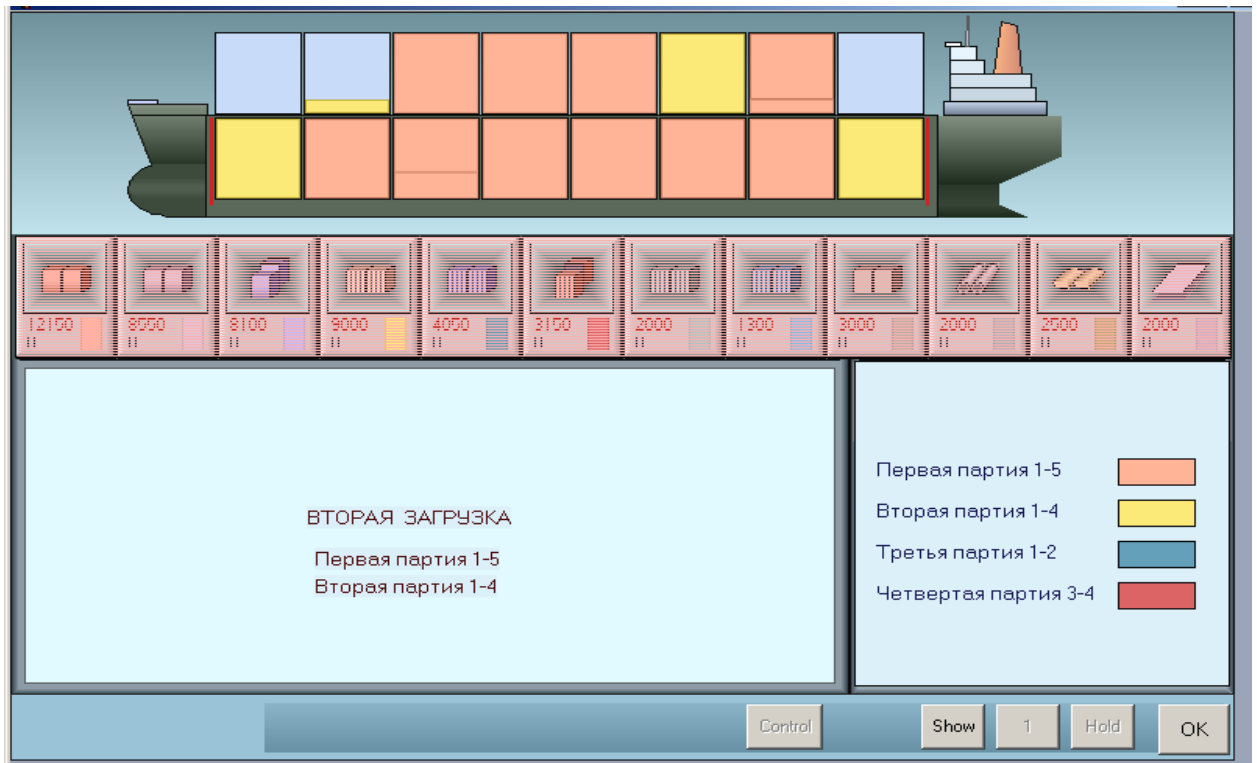


Рисунок 5.6 – Схема розміщення другого завантаження на судні

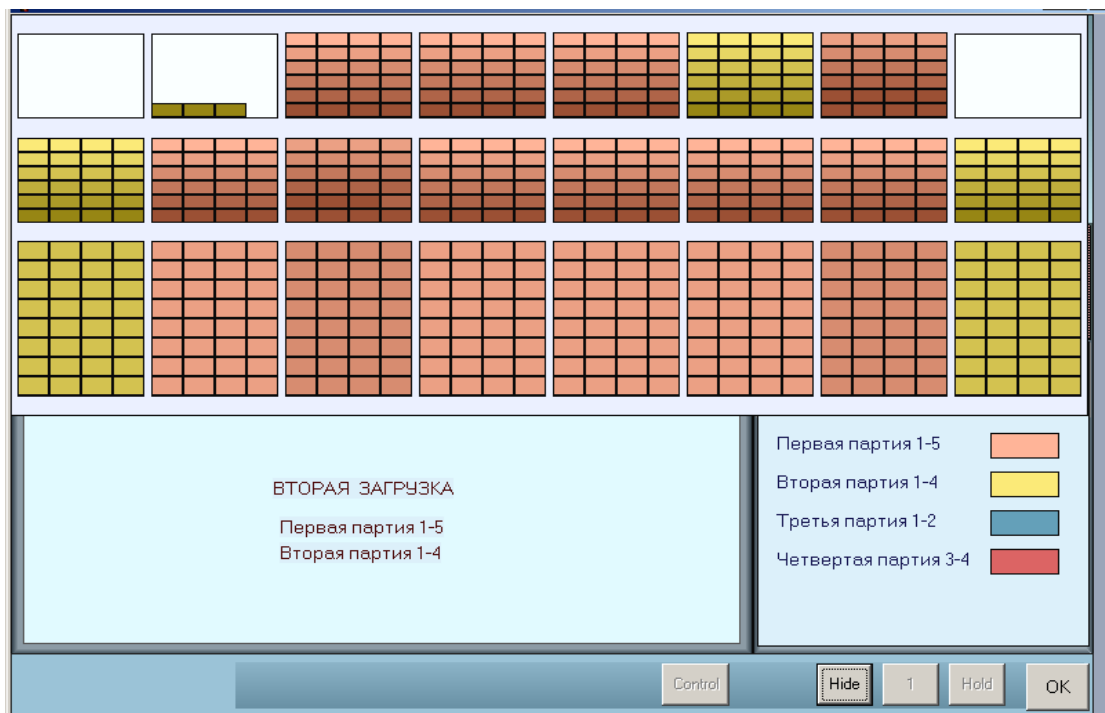


Рисунок 5.7 – Розміщення партій другого завантаження

першої партії P_1^5 повністю завантажені на кришки третього, четвертого, п'ятого та шостого трюмів. Контейнери другої партії P_1^4 розташовані на кришках другого (24 контейнерів) і шостого (повне завантаження) трюмів.

На рисунку 5.8 показані параметри посадки, остійності та загальної

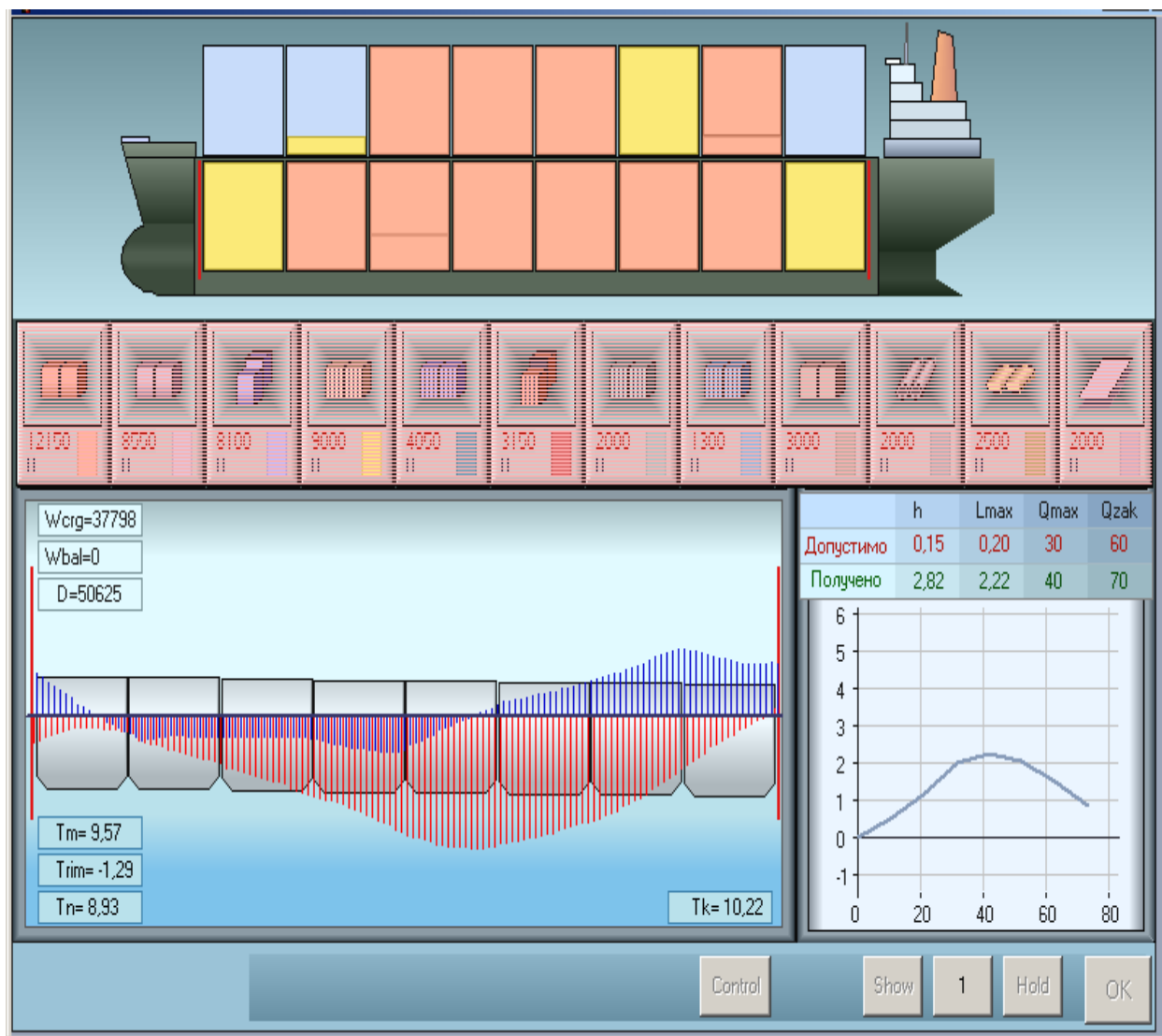


Рисунок 5.8 – Характеристики морехідної безпеки другого завантаження

поздовжньої міцності судна при його другому завантаженні. Як випливає з наведеного рисунка, параметри морехідної безпеки другого завантаження судна знаходяться в допустимих межах.

Третє завантаження судна є доповненням другого завантаження четвертою партією контейнерів P_3^4 . Розподіл партій контейнерів третього завантаження по вантажним приміщенням судна наведено в таблиці 5.7.

На рисунку 5.9 показана схема розміщення третього завантаження судна, що містить дві партії контейнерів P_1^4 та P_3^4 , номіновані в четвертий порт, і партію P_1^5 для п'ятого порту.

Таблиця 5.7 – Розподіл контейнерів третього завантаження по вантажним приміщенням

Партія	1 (P_1^5)	2 (P_1^4)	4 (P_3^4)	Σ
Приміщення				
1		192		192
2	192			192
3	192			192
4	192			192
5	192			192
6	192			192
7	192			192
8		192		192
9			192	192
10		24		24
11	192			192
12	192			192
13	192			192
14		192		192
15	192			192
16			96	96
Σ	1920	600	288	2808

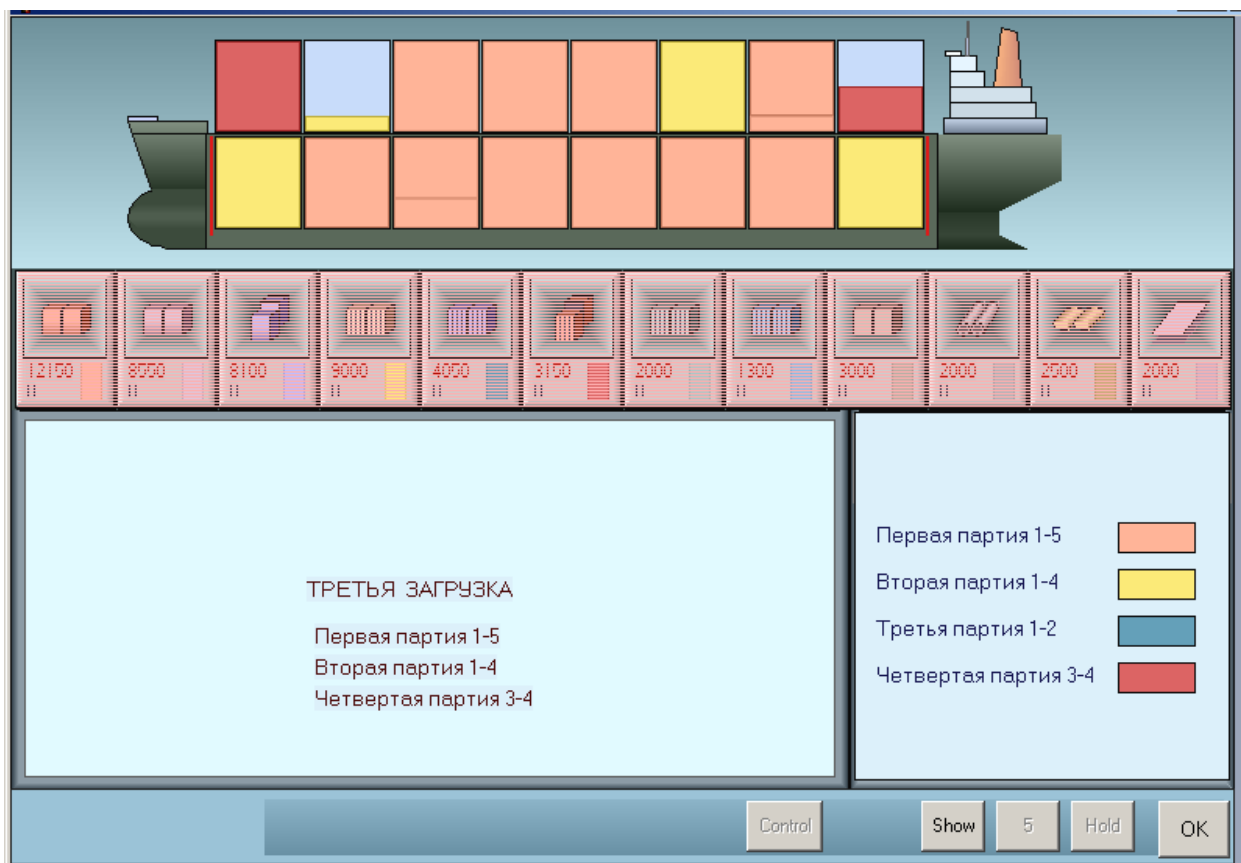


Рисунок 5.9 – Схема розміщення третього завантаження судна

Схематичне зображення розміщення контейнерів третього завантаження судна в вантажних приміщеннях показано на рисунку 5.10, причому додатково до контейнерів його другого завантаження у верхній частині рисунку зображено розміщення контейнерів четвертої партії P_3^4 на кришках першого і останнього трюмів, які на рисунку зображені червоним кольором. На кришку першого трюму здійснене повне завантаження, а на кришку останнього трюму – половина (96 контейнерів).

Параметри посадки, остійності та загальної поздовжньої міцності судна при його третьому завантаженні показані на рисунку 5.11.

З рисунку 5.11 випливає, що параметри посадки, остійності та загальної поздовжньої міцності судна при його третьому завантаженні знаходяться в

допустимих межах. Так, початкова метацентрична висота дорівнює 2,01 метри. Критерії діаграми статичної остійності задовольняють вимогам

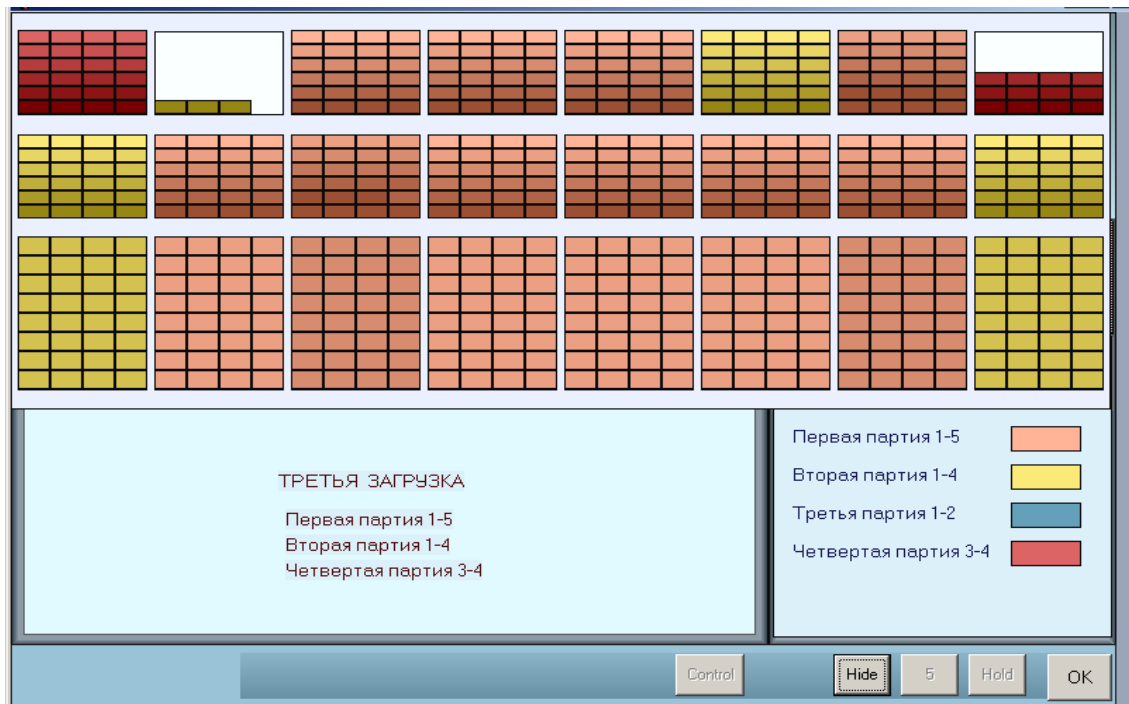


Рисунок 5.10 – Розміщення партій третьої завантаження в вантажних приміщеннях

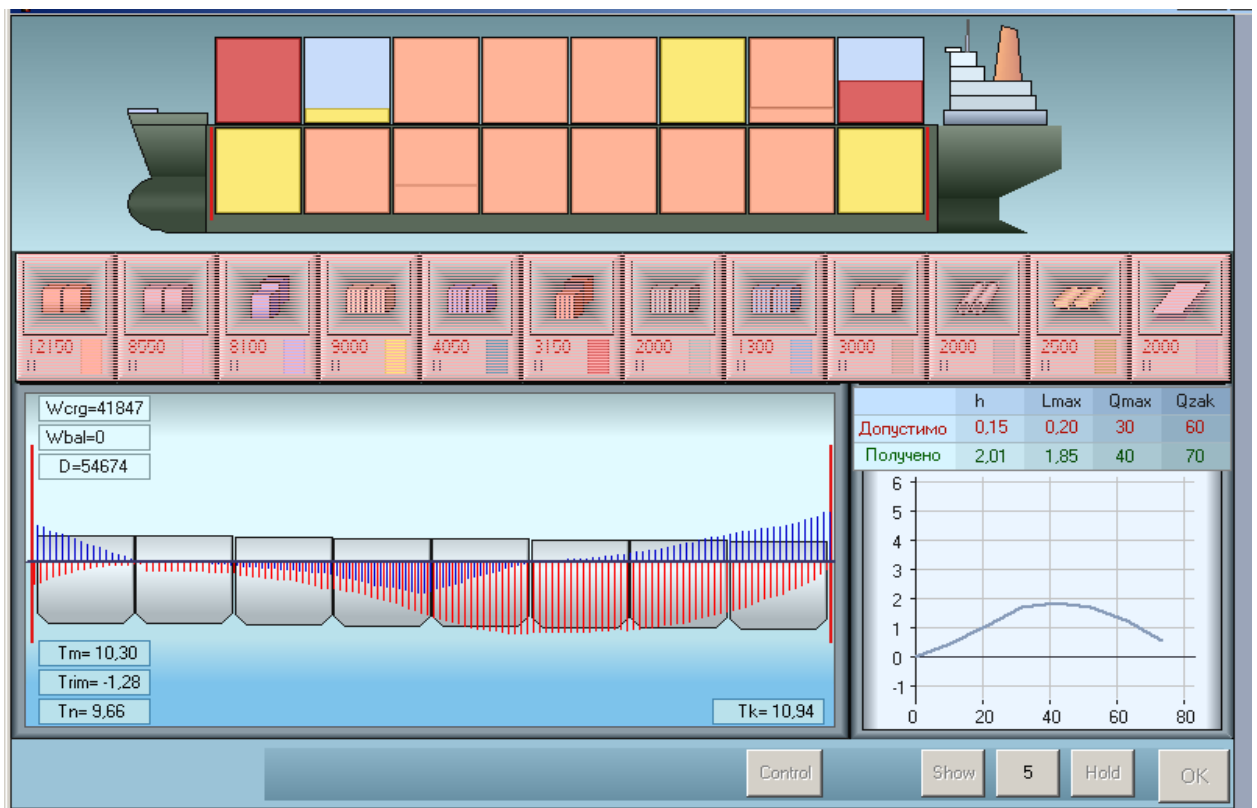


Рисунок 5.11 – Характеристики морехідної безпеки третього завантаження

морехідної безпеки: максимальне плече діаграми становить 1,85 метри, кут максимального плеча дорівнює 40° , а кут заходу – 70° . Диферент судна дорівнює – 1,28 метри, а значення перерізуючих сил і згинальних моментів не перевершують їх гранично-допустимих значень.

У четвертому порті вивантажуються партії контейнерів P_1^4 та P_3^4 , тому четверте завантаження становить лише партія для п'ятого порту. Її розміщення по вантажних приміщеннях судна показано в другому стовпці таблиці 5.4 і показано на рисунку 5.12.

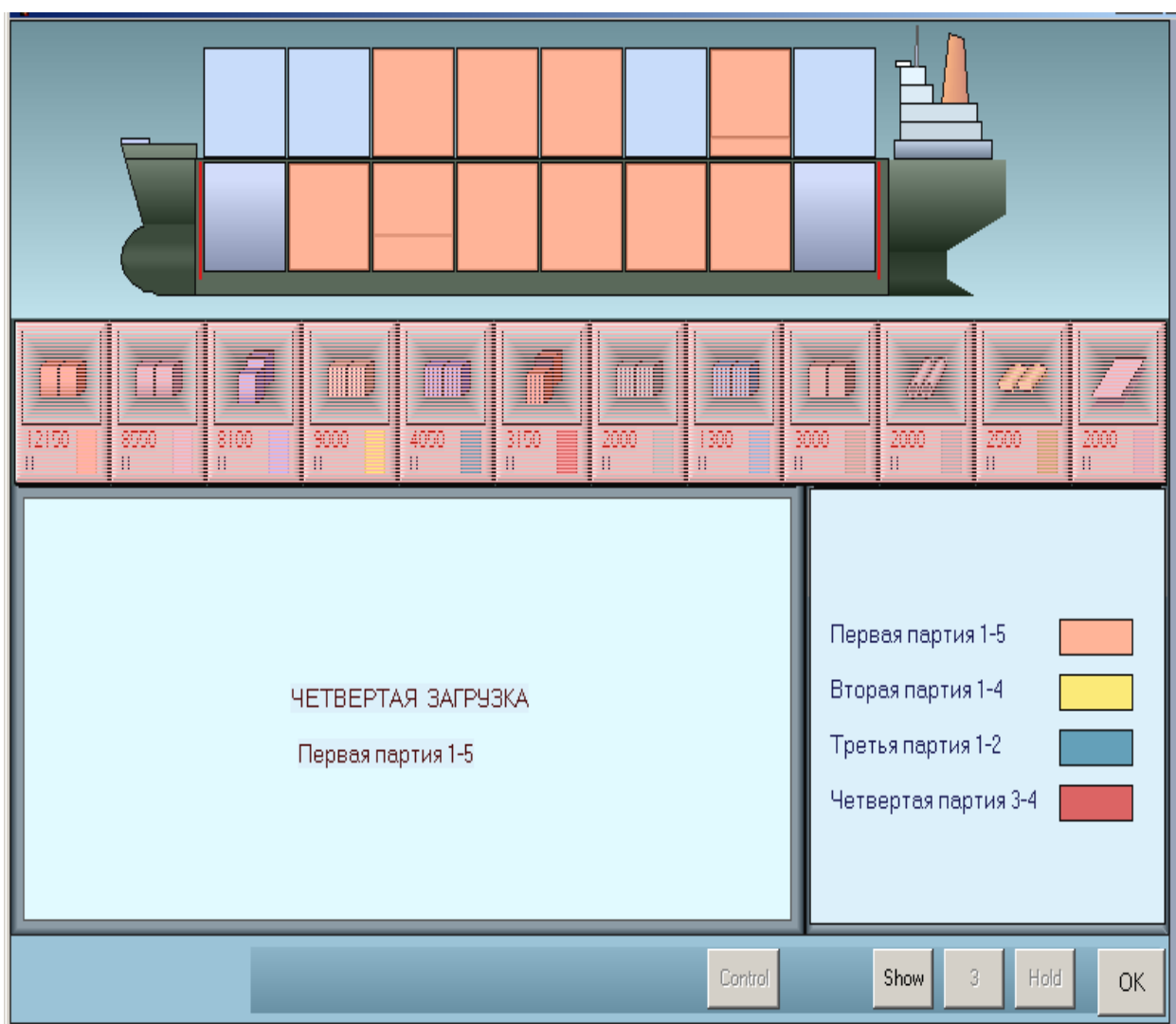


Рисунок 5.12 – Схема розміщення четвертого завантаження на судні

Контейнери четвертого завантаження розміщені в шести трюмах і на кришках чотирьох трюмів і їх схема розташування в вантажних приміщеннях судна представлена на рисунку 5.13. Так як четверте завантаження буде містити усі три інших завантаження, то розміщення її контейнерів необхідно планувати в першу чергу у відповідності з рекомендаціями, запропонованими в четвертому розділі. З рисунку 5.13 видно, що контейнери розташовані симетрично щодо мідель-шпангоуту судна, чим забезпечується зручність планування розміщення контейнерів інших завантажень.

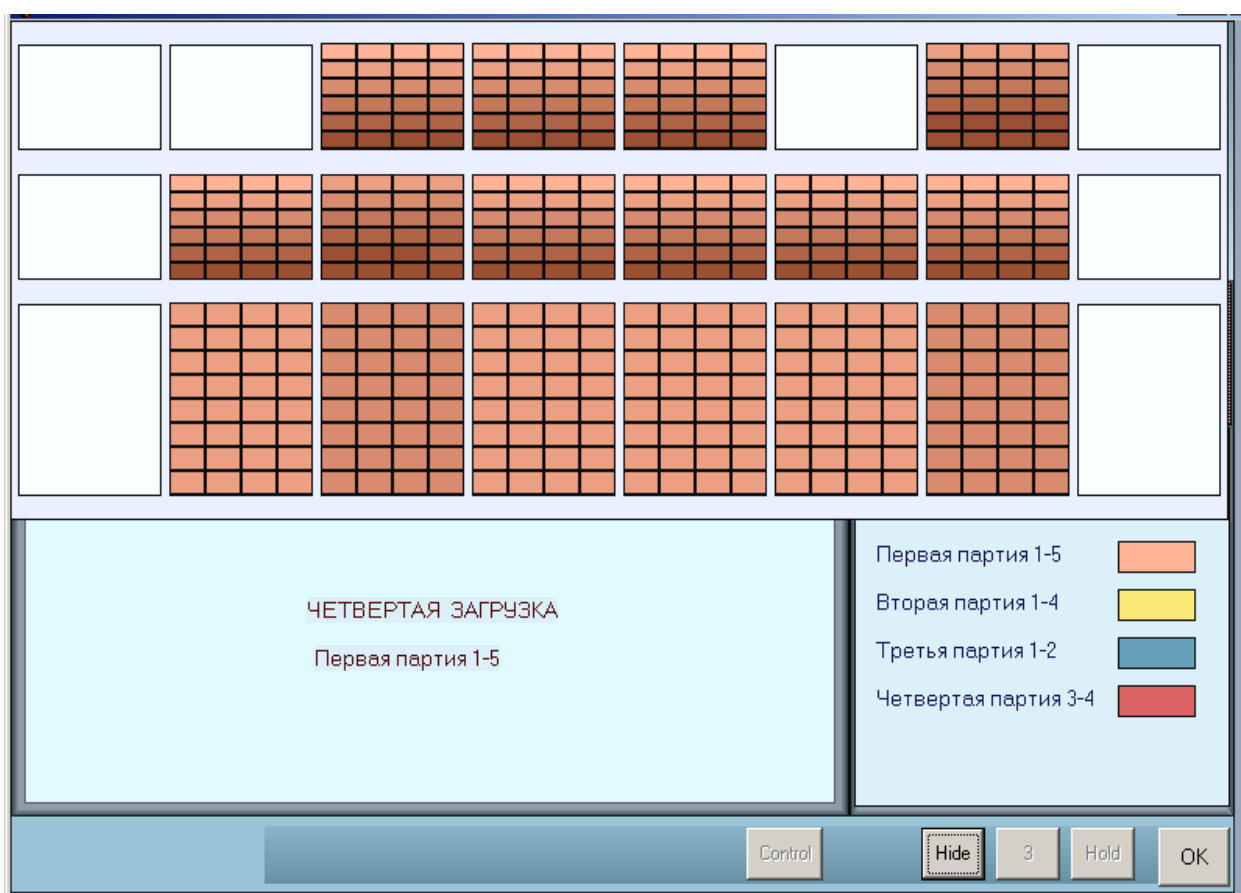


Рисунок 5.13 – Розміщення партій четвертого завантаження

Характеристики морехідної безпеки четвертого завантаження судна представлені на рисунку 5.14. Диферент судна дорівнює $-0,05$ метри, тобто судно знаходиться майже на рівному кілі з середньою осадкою $7,93$ метри. Критерії остійності задовольняють вимогам морехідної безпеки, а

перерізуючі сили і згинальні моменти не перевершують гранично-допустимих значень.

Таким чином, розміщення контейнерів всіх чотирьох завантажень забезпечило доступність до партій під час вивантаження, допустимі значення параметрів посадки, остійності та загальної поздовжньої міцності судна. Отже, метод формування завантаження судна в разі прийому і здачі партій контейнерів в декількох портах і використовувані в ньому аналітичні вирази і процедури є коректними, що підтверджує практичну значимість дисертаційного дослідження.

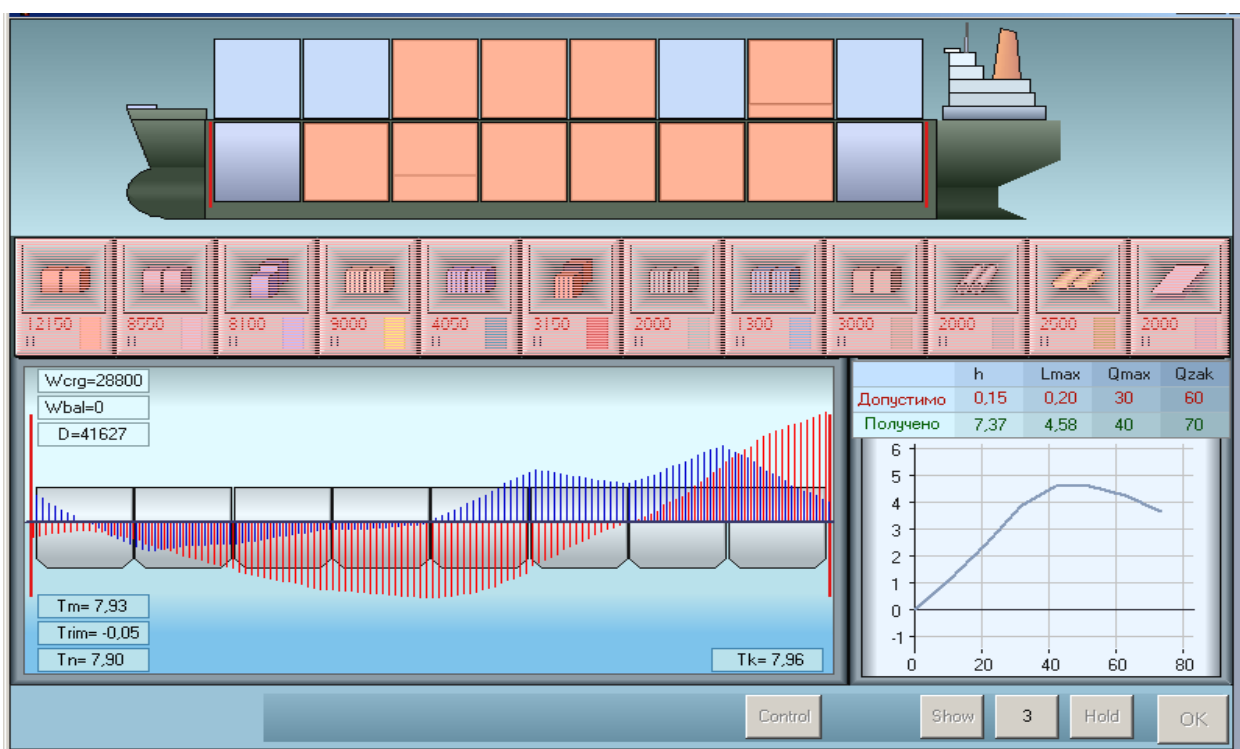


Рисунок 5.14 – Характеристики морехідної безпеки четвертого завантаження

Зведена інформація щодо морехідної безпеки всіх завантажень судна під час його рейсу приведена в таблиці 5.8, в якій вказані значення початкової метацентричної висоти, критеріїв діаграми статичної остійності і параметрів посадки судна, а також їх допустимі значення.

5.4 Контроль плану розміщення контейнерів по вантажних приміщеннях судна за допомогою імітаційної програми

Розроблена імітаційна програма містить модуль контролю плану розміщення контейнерів по вантажних приміщеннях судна, який дозволяє в тривимірному зображенні показати розташування контейнерів в баях обраного вантажного приміщення судна.

Після завантаження останньої партії контейнерів активізується кнопка «Hold», за допомогою якої проводиться вибір трюму для перегляду його вмісту.

Таблиця 5.8 – 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
$\theta_{\max}$	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

На рисунку 5.15 показаний вибір першого трюму, перегляд вмісту якого здійснюється за допомогою клавіші «Check». За допомогою «натискання» клавіші «Check» на рисунку 5.16 показаний перший бей першого трюму, а в лівій частині екрана на зображенні кожного контейнеру вказується його ранжований за вагою порядковий номер в партії, тобто зі збільшенням номеру контейнеру його вага зменшується. За допомогою ще двох «натискань»

клавіші «Check» отримуємо графічне зображення і інформацію по третьому бейі першого трюму, як показано на рисунку 5.17. Звертаємо увагу, що для створення необхідної остійності вага ярусів зменшується з ростом

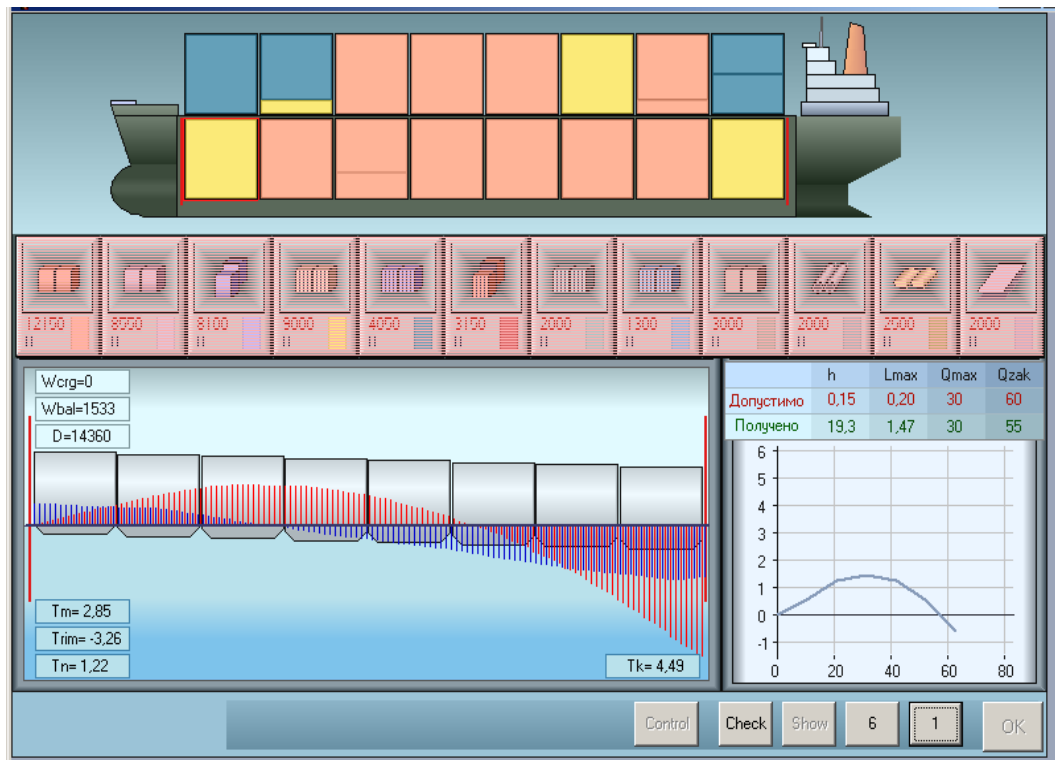


Рисунок 5.15 – Вибір першого трюму для контролю укладки

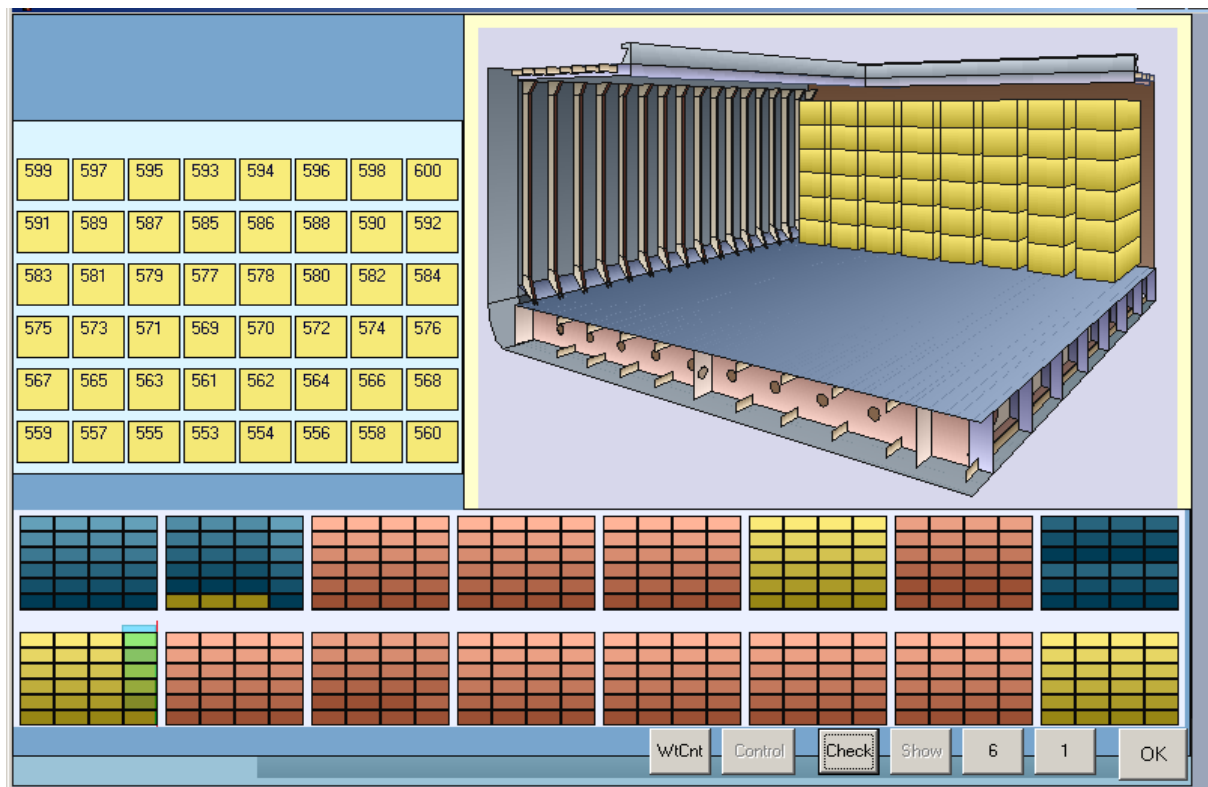


Рисунок 5.16 – Відображення першого бейі першого трюму

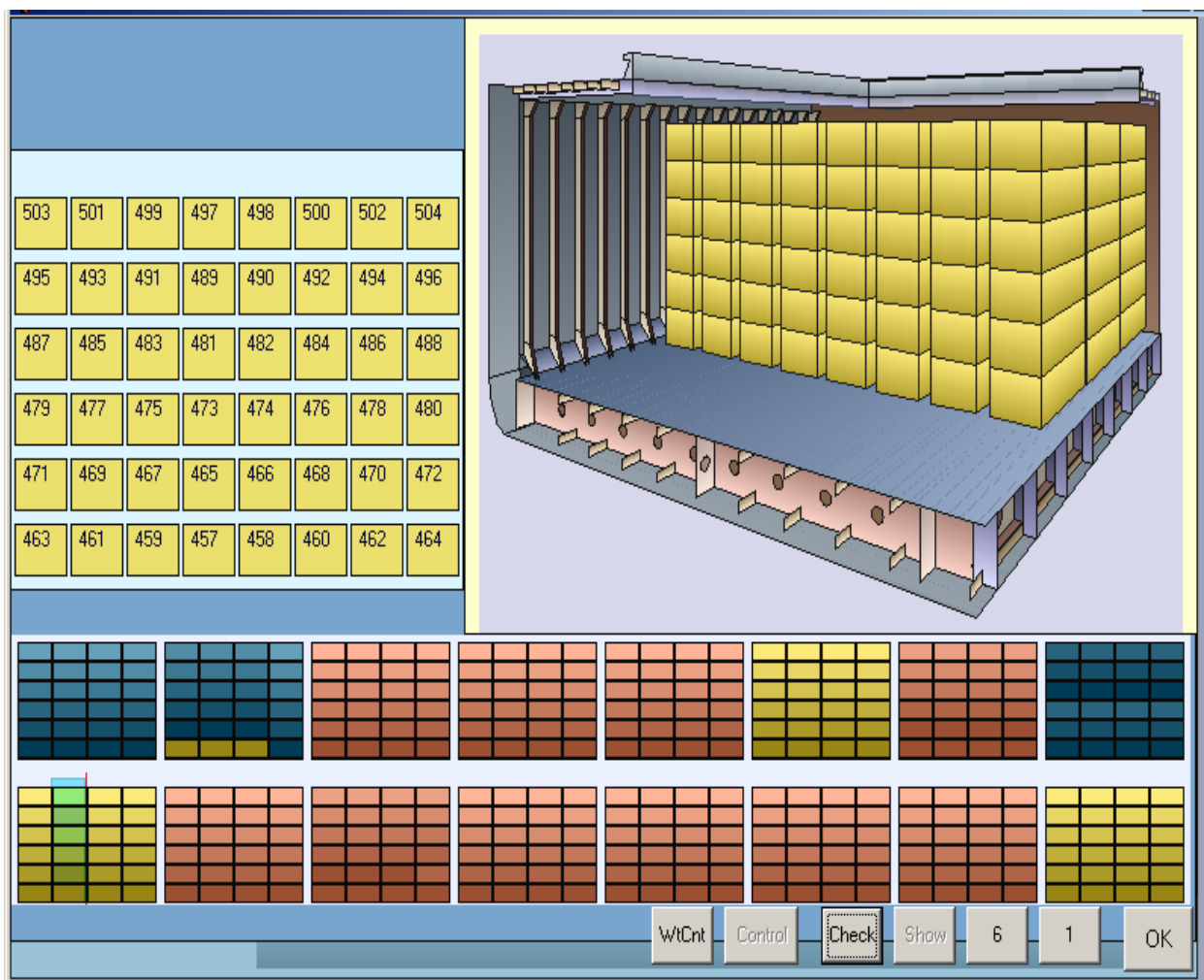


Рисунок 5.17 – Відображення третього бею першого трюму

його номеру, тобто від низу до верху. Контейнери в ярусі розташовані в порядку зменшення їх ваги від центру ярусу до його країв для створення моменту інерції судна, що мінімізує сили інерції качки, які впливають на контейнер.

На рисунку 5.18 показаний вибір четвертого трюму для перегляду контейнерів, які знаходяться в ньому і отримання інформації щодо їх розміщення. При цьому, як випливає з рисунка, вказані номери контейнерів відображеного бею. Відображення другого бею четвертого трюму, який виділено на нижній частині рисунку, показано на рисунку 5.19, а на рисунку 5.20 представлено відображення четвертого бею того ж трюму, причому на рисунку також зображені попередні беї контейнерів.

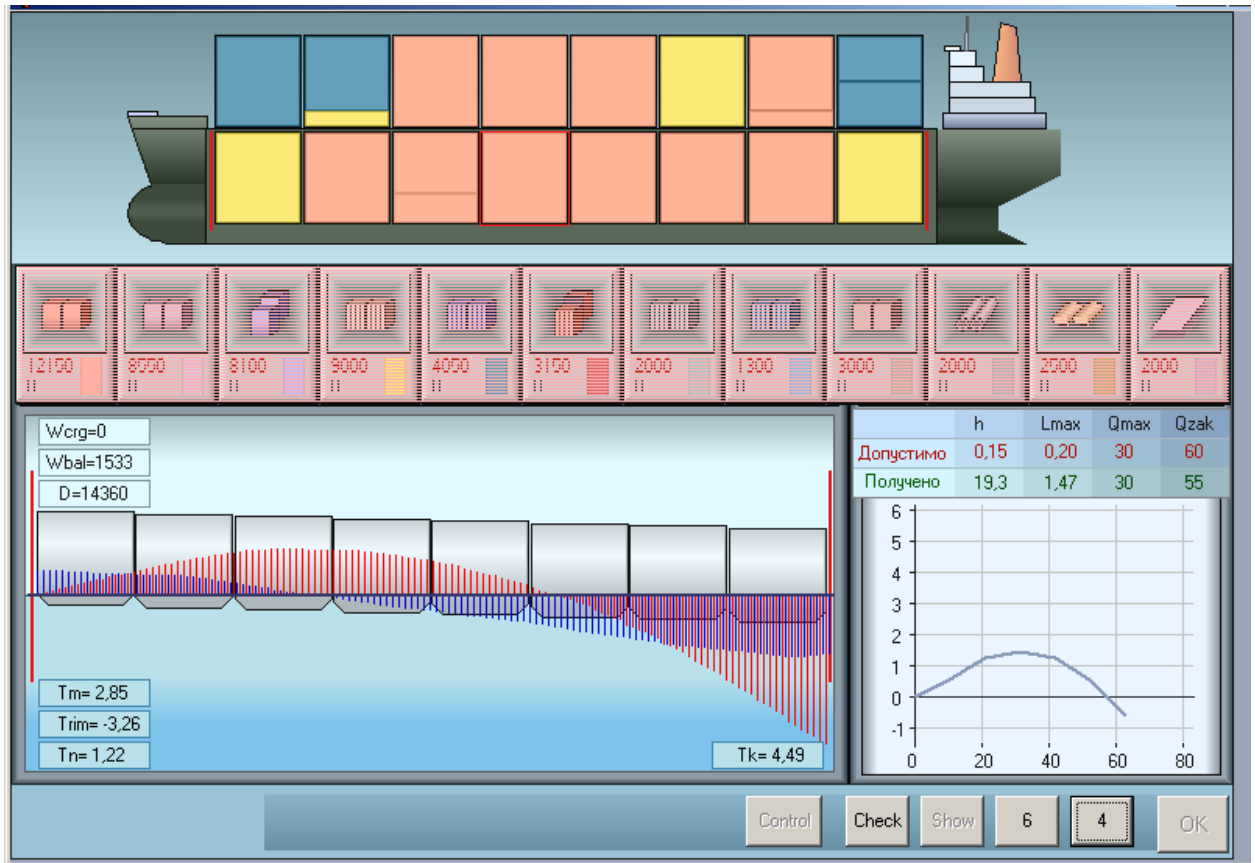


Рисунок 5.18 – Вибір четвертого трюму для контролю укладки

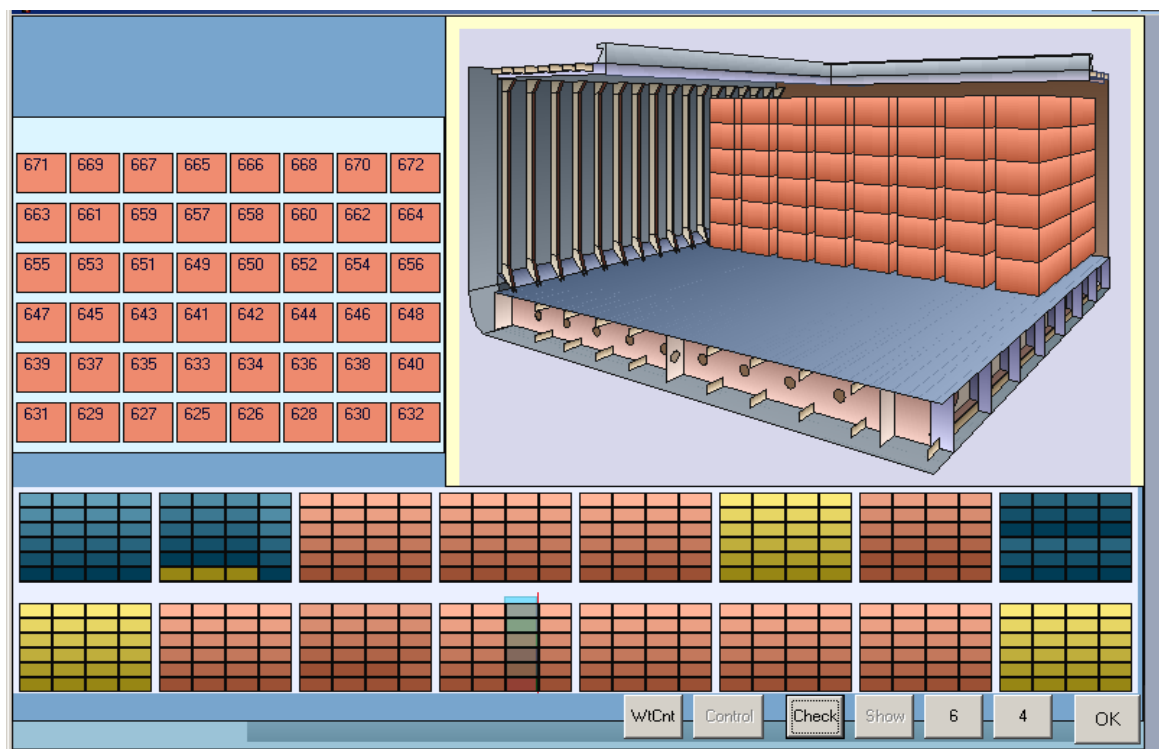


Рисунок 5.19 – Відображення другого боку четвертого трюму

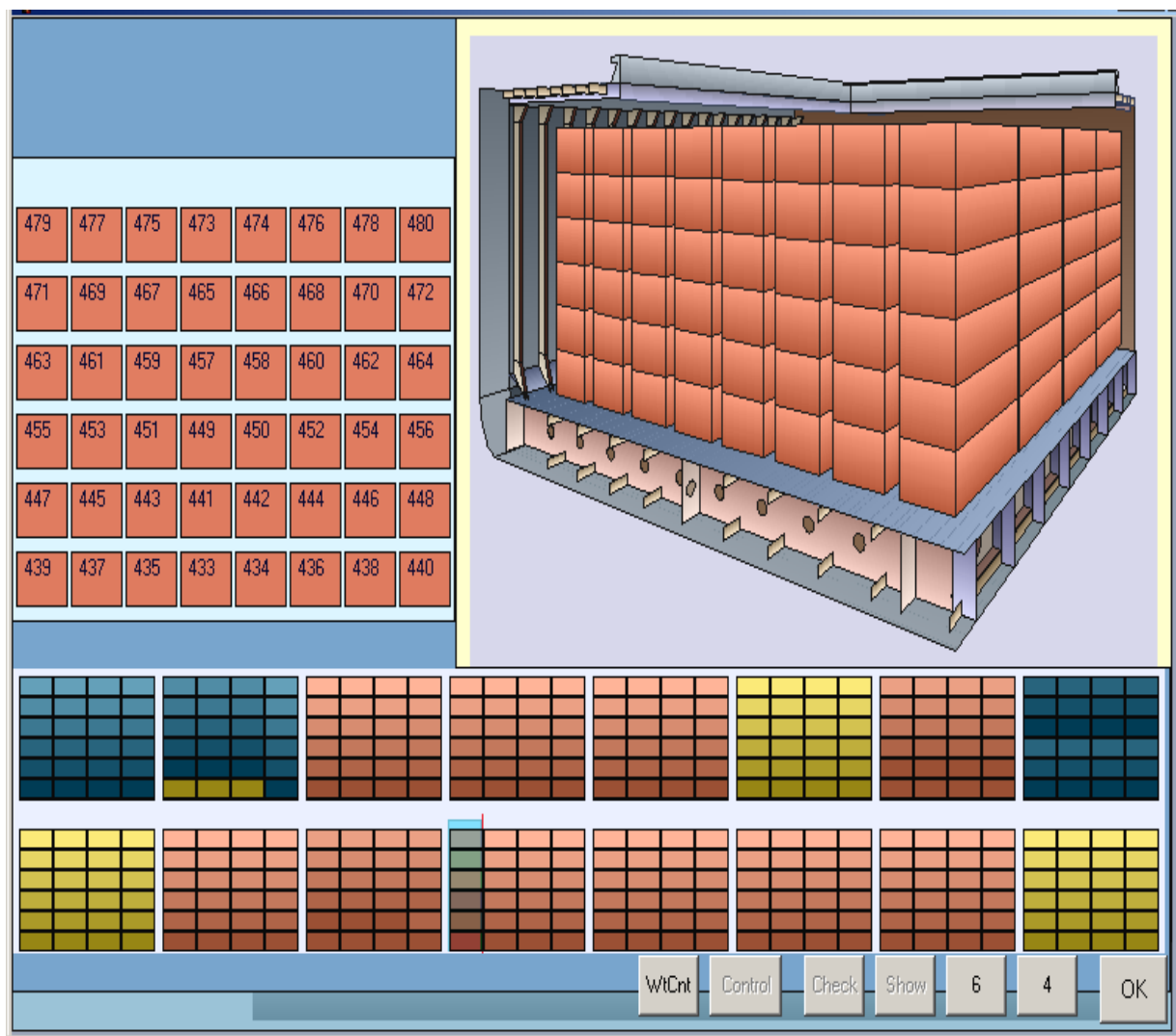


Рисунок 5.20 – Відображення четвертого бею четвертого трюму

Вибір для перегляду контейнерів на кришці першого трюму показаний на рисунку 5.21. Як випливає з рисунку, на ньому вказані номери контейнерів відображеного бею. Відображення першого бею контейнерів на кришці першого трюму показано на рисунку 5.22, а відображення четвертого бею кришки першого трюму представлено на рисунку 5.23. Порівнюючи рисунки 5.22 і 5.23, відзначаємо, що з метою створення необхідної остійності вага ярусів в кожному беї зменшується з ростом його номеру, а в ярусі контейнери розташовані в порядку зменшення їх ваги від центру ярусу до його країв. Це необхідно для створення моменту інерції судна щодо його поздовжньої вісі, який мінімізує сили інерції хитамиці, які впливають на контейнер. Вага бею збільшується з кормового в напрямку носового бею.

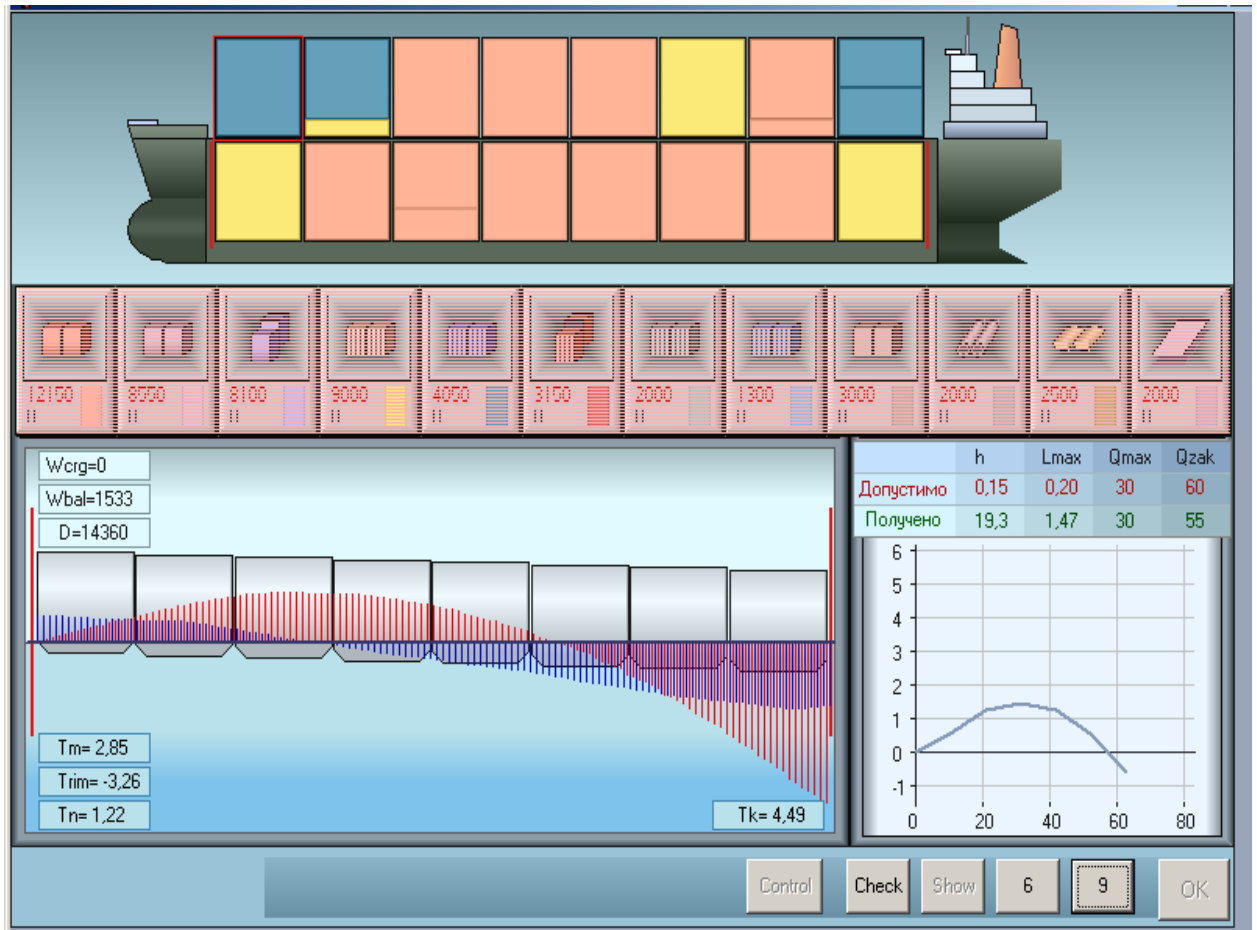


Рисунок 5.21 – Вибір кришки першого трюму для контролю укладки

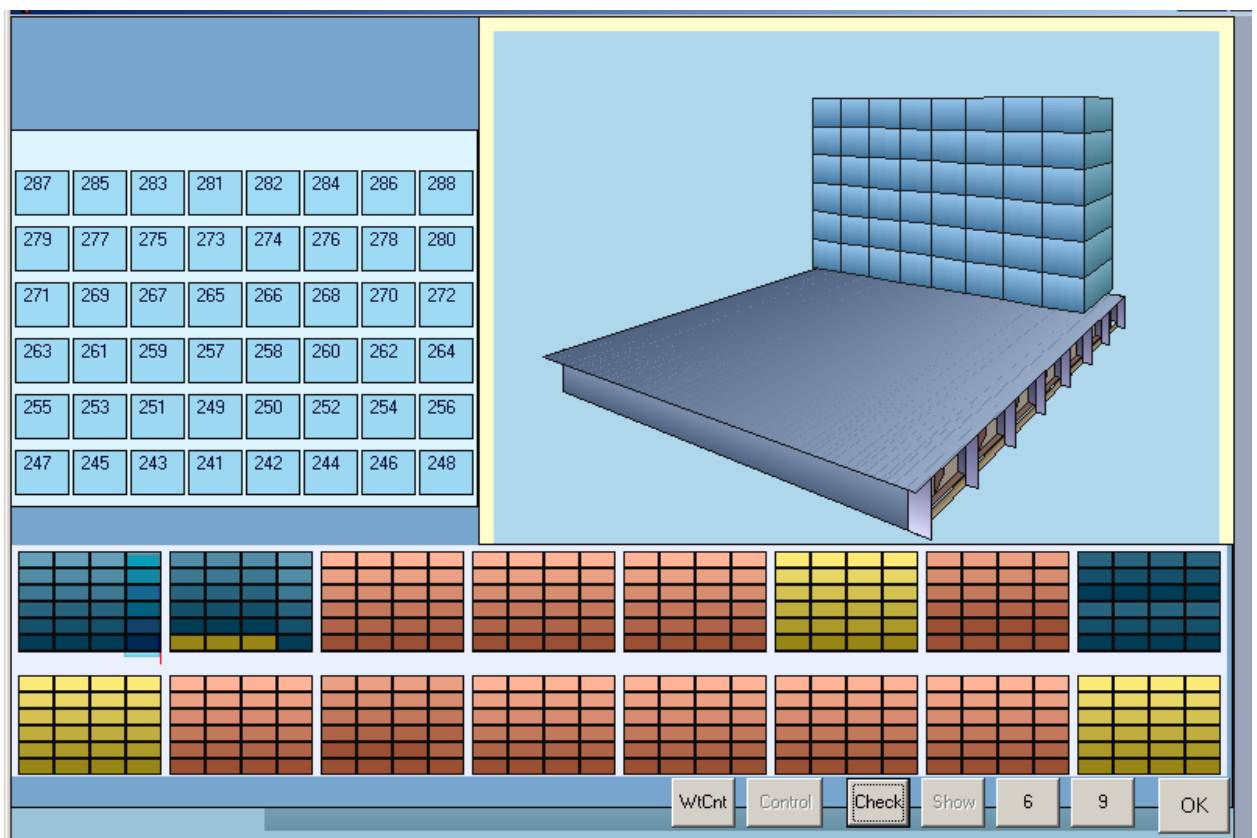


Рисунок 5.22 – Відображення першого бею кришки першого трюму

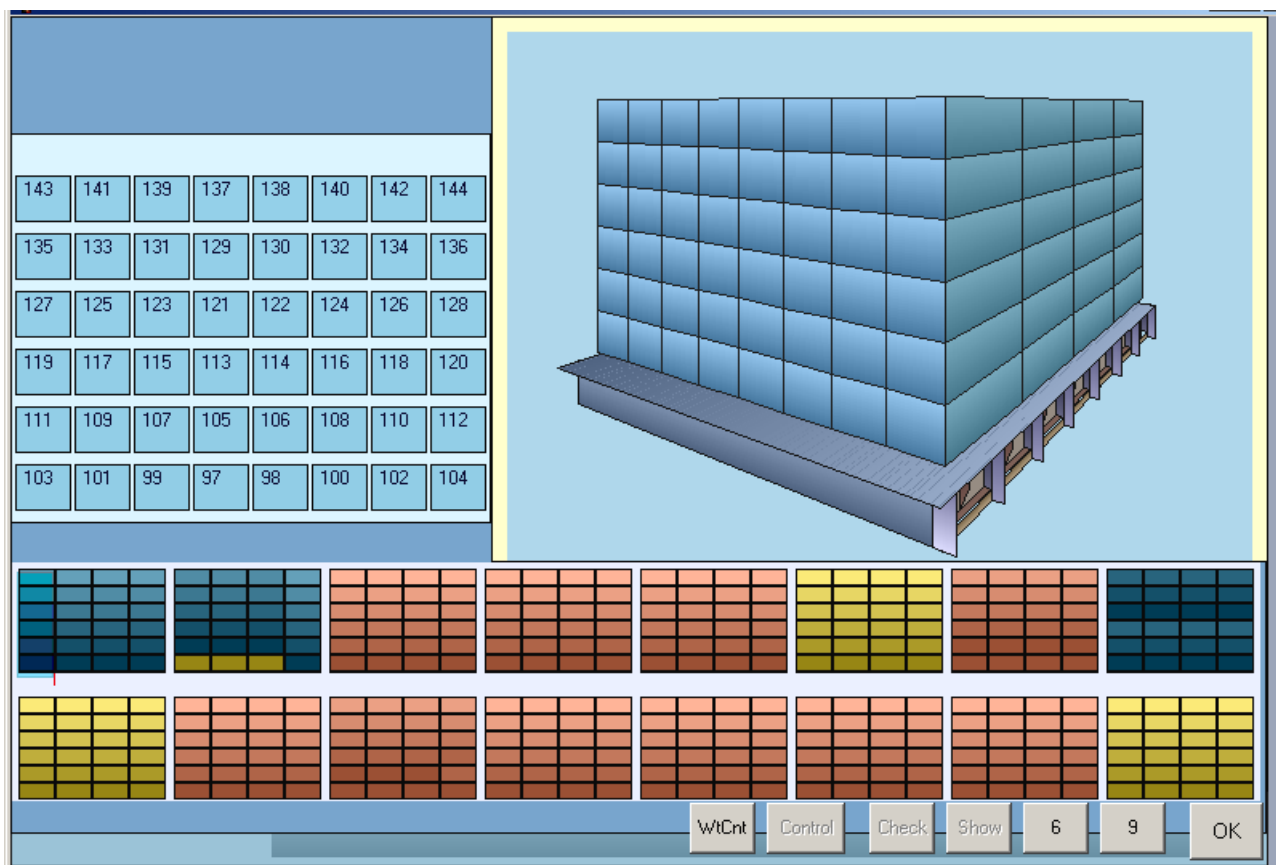


Рисунок 5.23 – Відображення четвертого бею кришки першого трюму

Черговою групою контейнерів, обраної для перегляду, є контейнери, які розташовані на кришці п'ятого трюму, причому на рисунку 5.24 показаний вибір цієї групи контейнерів для перегляду.

Відображення першого бею контейнерів на кришці п'ятого трюму показано на рисунку 5.25, на якому крім тривимірного зображення укладання контейнерів бею також вказані номери його контейнерів. На рисунку 5.26 представлено відображення розміщення контейнерів в четвертому беї на кришці п'ятого трюму. Звертаємо увагу, що в цьому беї розміщені найважчі контейнери першої партії з ранжируваними номерами від 1 до 48, причому вісім найважчих контейнерів складають перший (нижній) ярус четвертого бею. Зі збільшенням номеру ярусу його вага зменшується, а порядок розміщення контейнерів в ярусі такий саме, як і в попередніх вантажних приміщеннях.

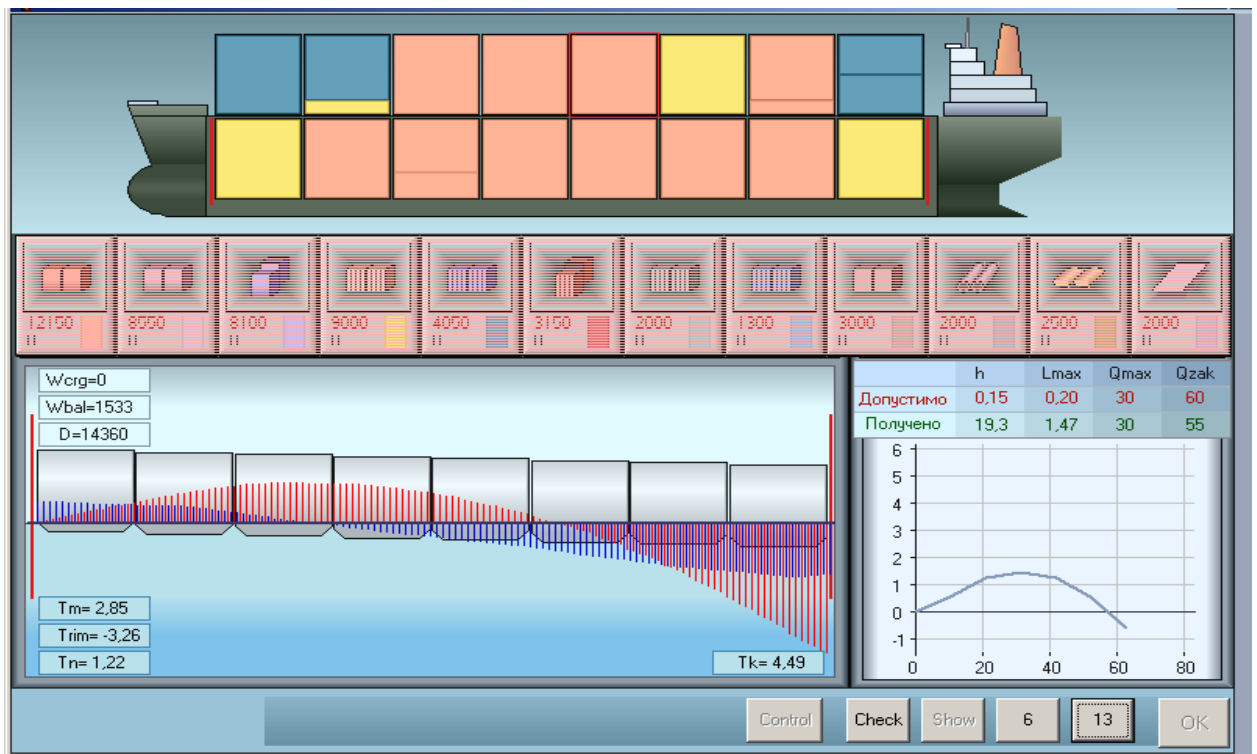


Рисунок 5.24 – Вибір кришки 5-го трюму для контролю укладки контейнерів

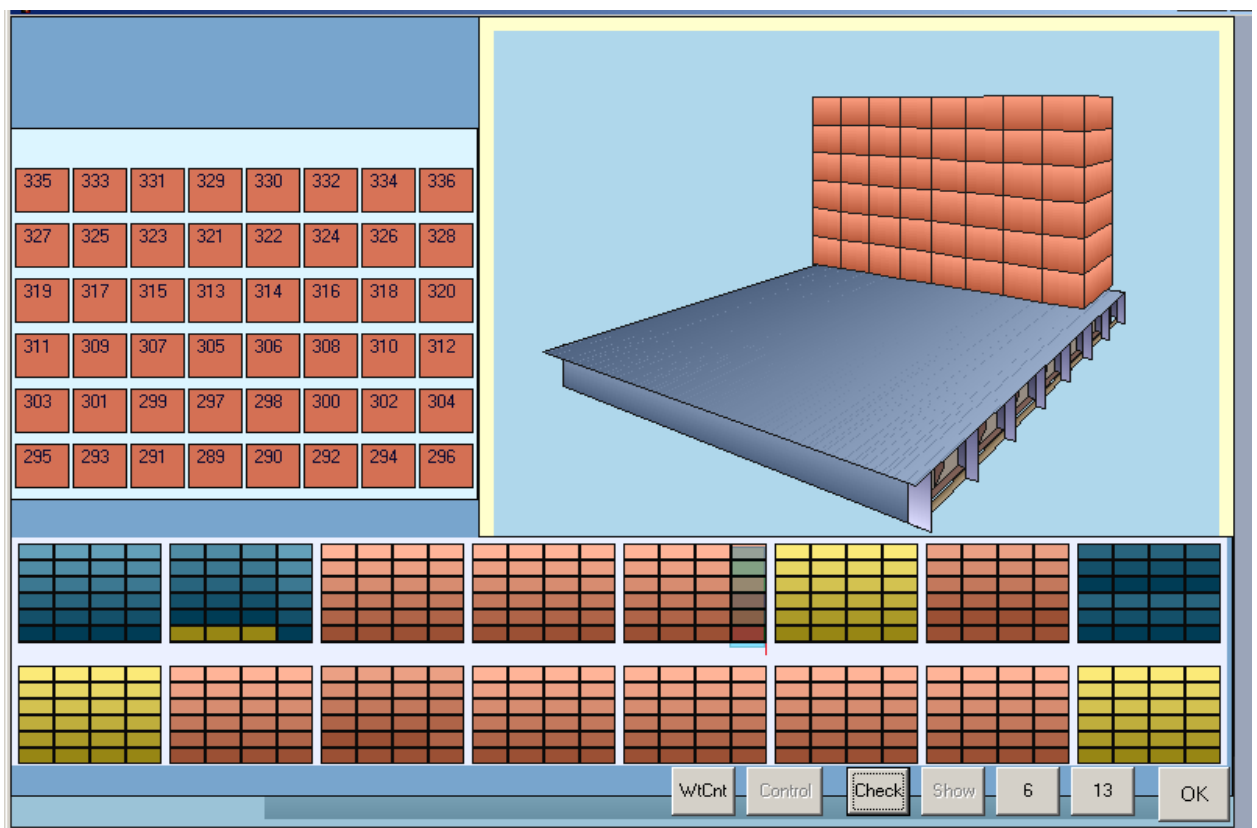


Рисунок 5.25 – Відображення першого боку кришки п'ятого трюму

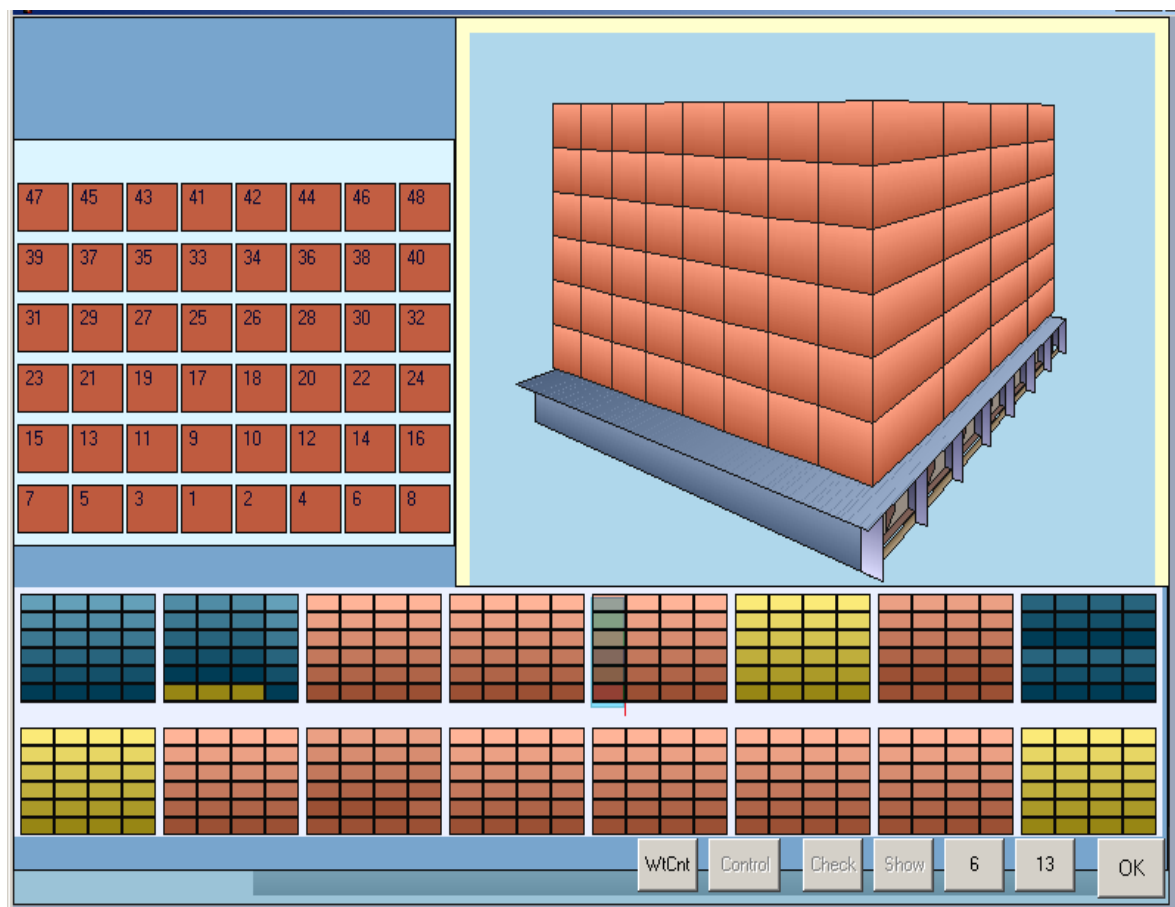


Рисунок 5.26 – Відображення четвертого бею кришки п'ятого трюму

Наступною групою розглянутих контейнерів є контейнери, розташовані на кришці шостого трюму, чому присвячений рисунок 5.27, на якому показаний вибір даної групи контейнерів для перегляду.

На рисунку 5.28 показаний перший бей контейнерів на кришці шостого трюму, на якому виведено тривимірне зображення укладання контейнерів бею, а також вказані номери його контейнерів, а на рисунку 5.29 представлено відображення розміщення контейнерів третього бею на кришці шостого трюму. Звертаємо увагу, що ця група контейнерів сформована з другої партії вантажу (показаної на рисунку жовтим кольором).

У нижній частині рисунка показаний схематичний розподіл партій контейнерів по вантажних приміщеннях судна, причому в нижній частині

рисунку показано розміщення контейнерів в восьми трюмах судна і вище – на їх кришках.

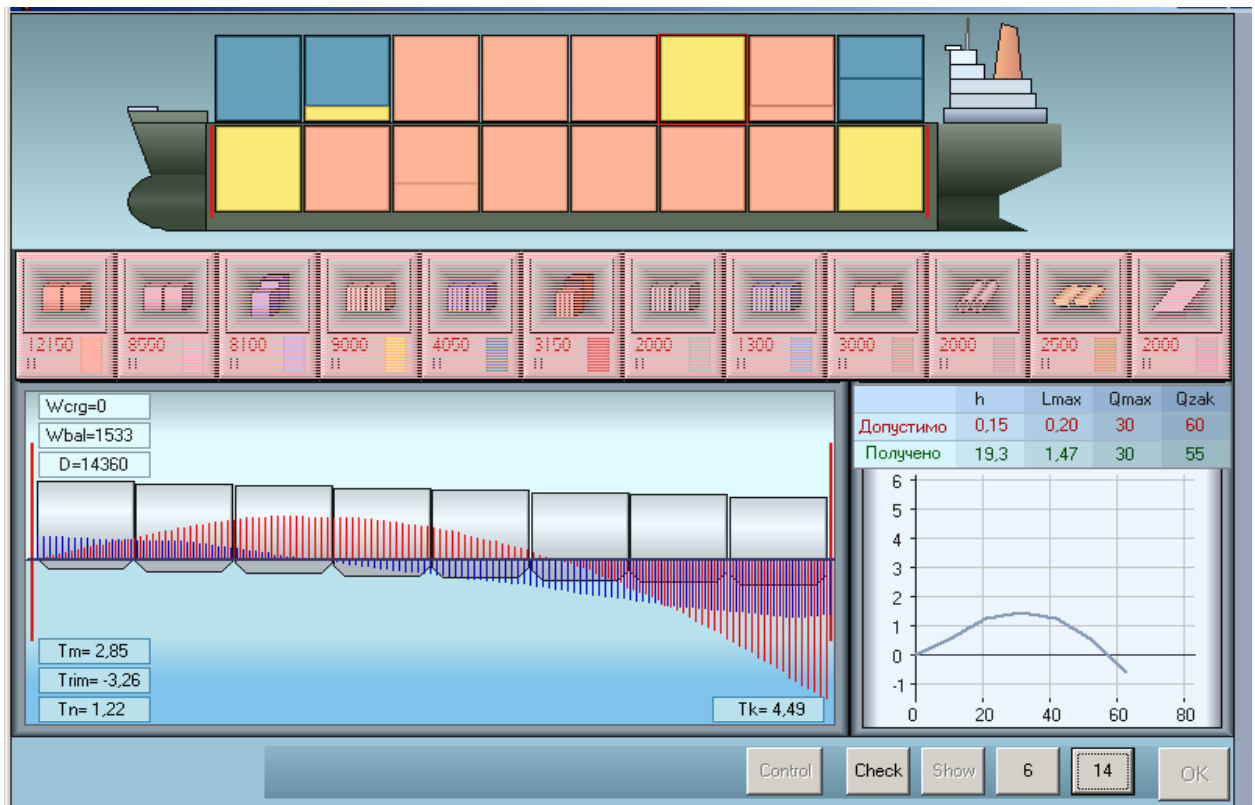


Рисунок 5.27 – Вибір кришки 6-го трюму для контролю укладки контейнерів

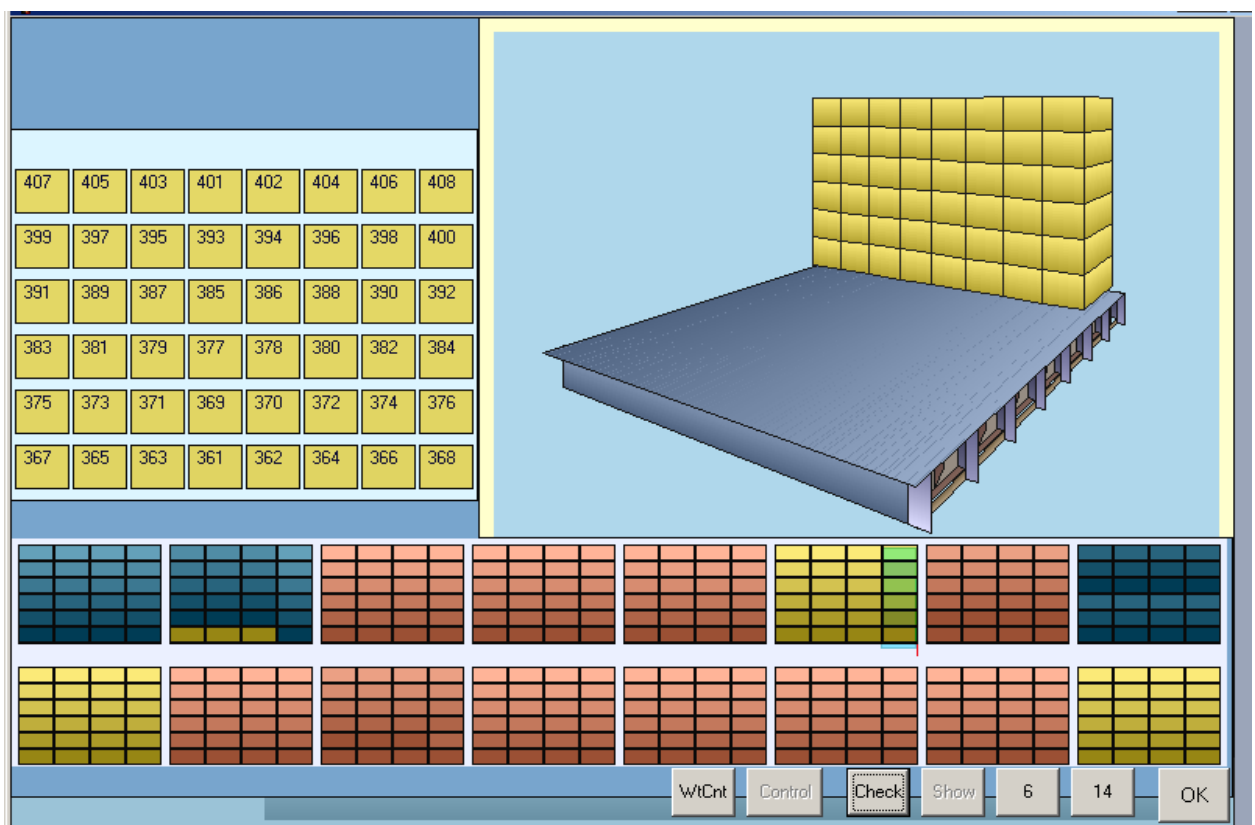


Рисунок 5.28 – Відображення першого беу кришки шостого трюму

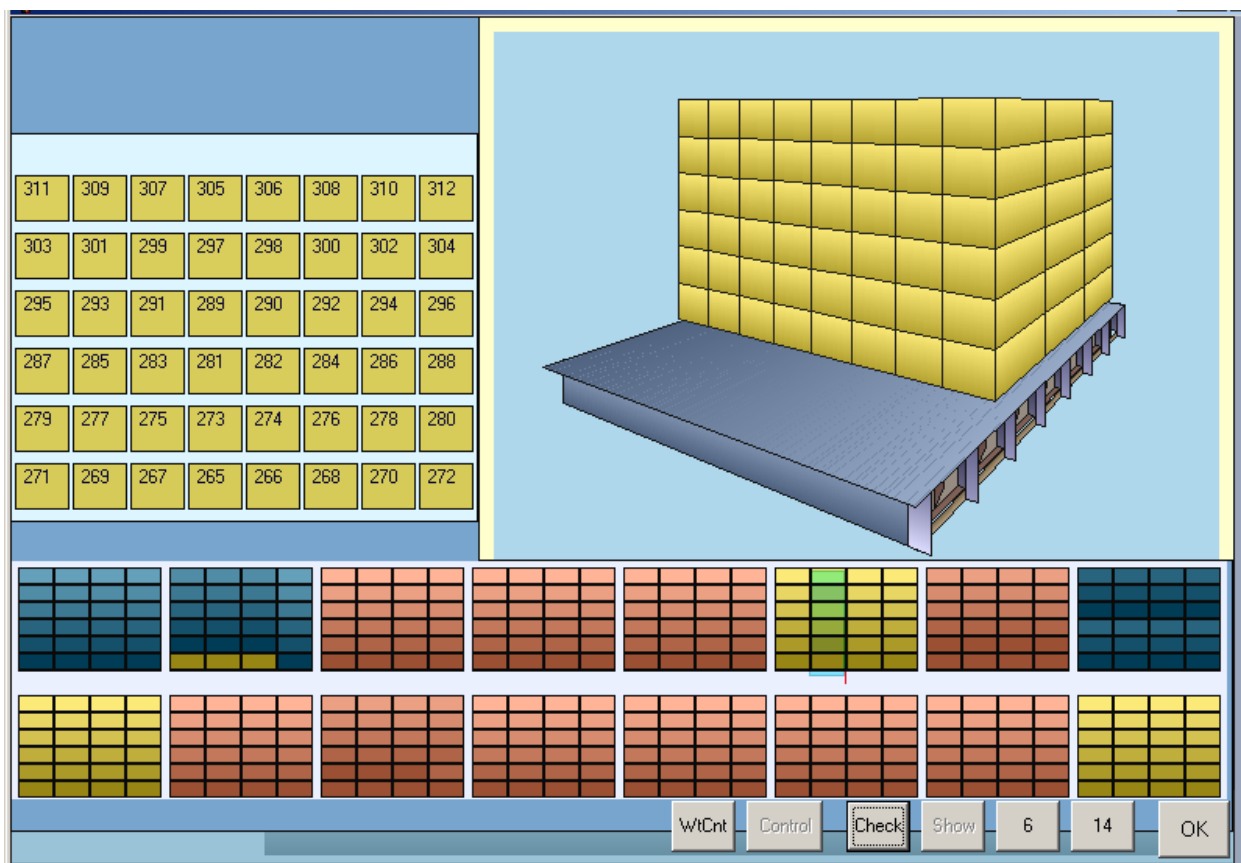


Рисунок 5.29 – Відображення третього бею кришки шостого трюму

На рисунку 5.30 відображений вибір для перегляду контейнерів на кришці другого трюму. З рисунку зрозуміло, що на ньому вказані номери контейнерів відображеного бею. Особливістю даної групи контейнерів є те, що вони містять контейнери різних партій: другої і третьої, причому контейнери другої партії розміщені в нижніх ярусах трьох беїв, а решта контейнерів – з третьої партії.

На рисунку 5.31 показано відображення першого бею контейнерів на кришці другого трюму, а відображення другого бею кришки другого трюму представлено на рисунку 5.32. Відображення четвертого бею кришки другого трюму показано на рисунку 5.33. З рисунків 5.32 і 5.33 видно, що нижні яруси другого, третього і четвертого беїв містять контейнери другої партії, а інші яруси складаються з контейнерів третьої партії. Розподіл ваги по ярусах забезпечує задану остійність судна, а в ярусах – мінімальні сили інерції під час хитавиці.

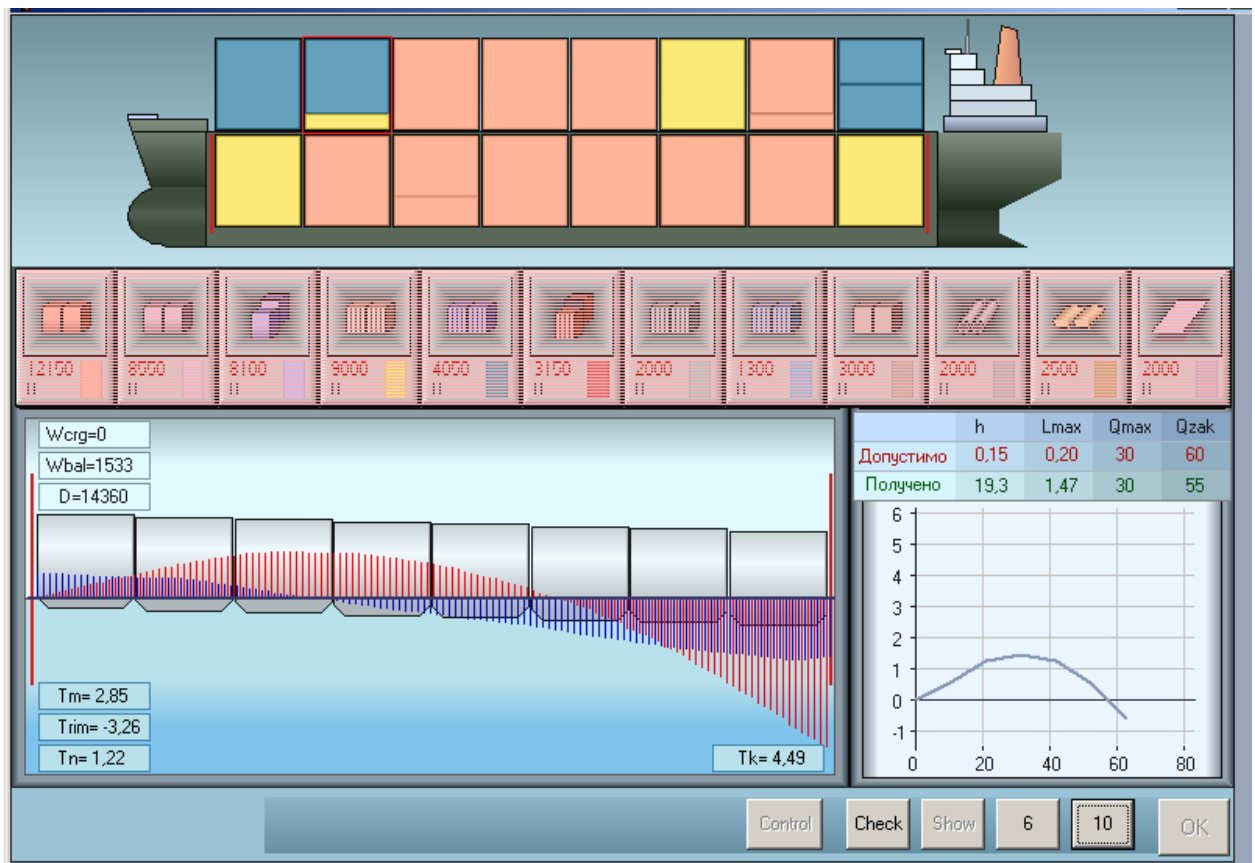


Рисунок 5.30 – Вибір кришки 2-го трюму для контролю укладки контейнерів

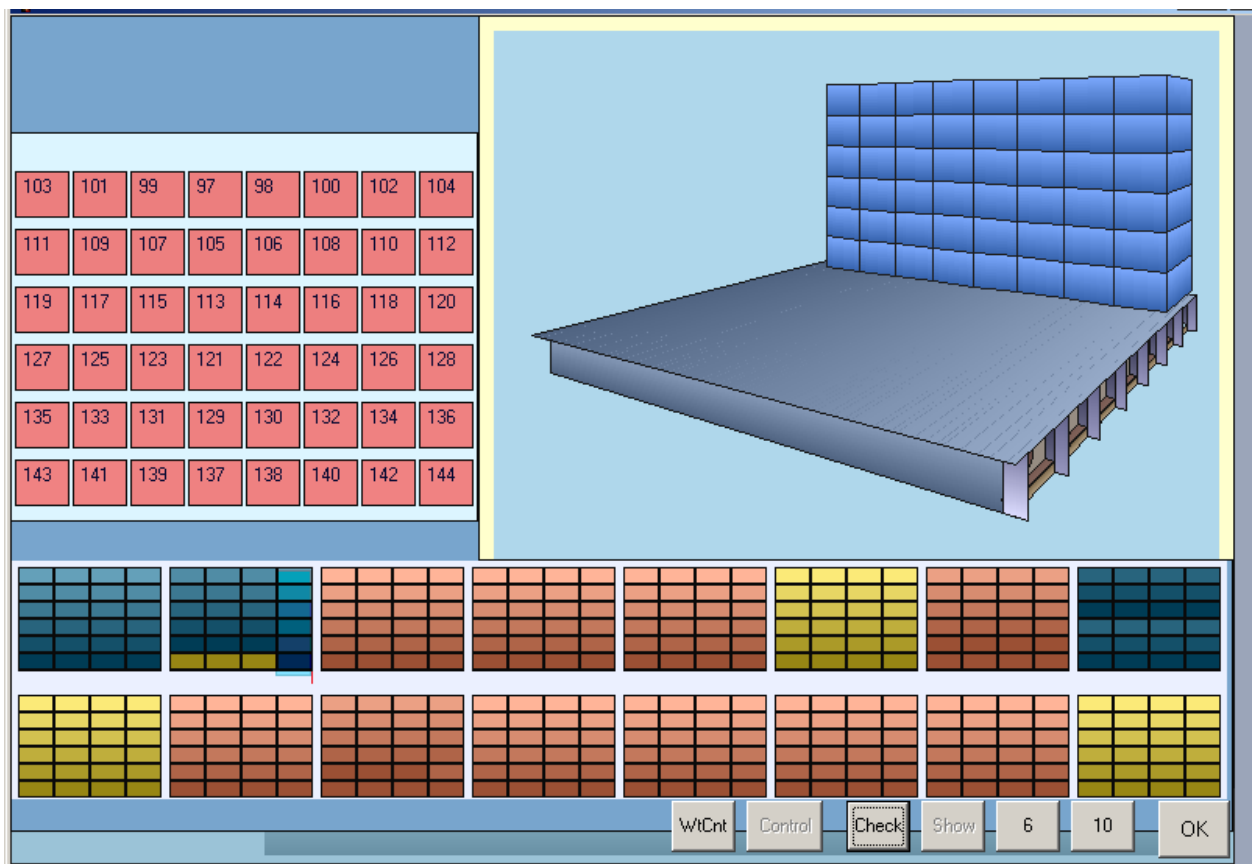


Рисунок 5.31 – Відображення першого беу кришки другого трюму

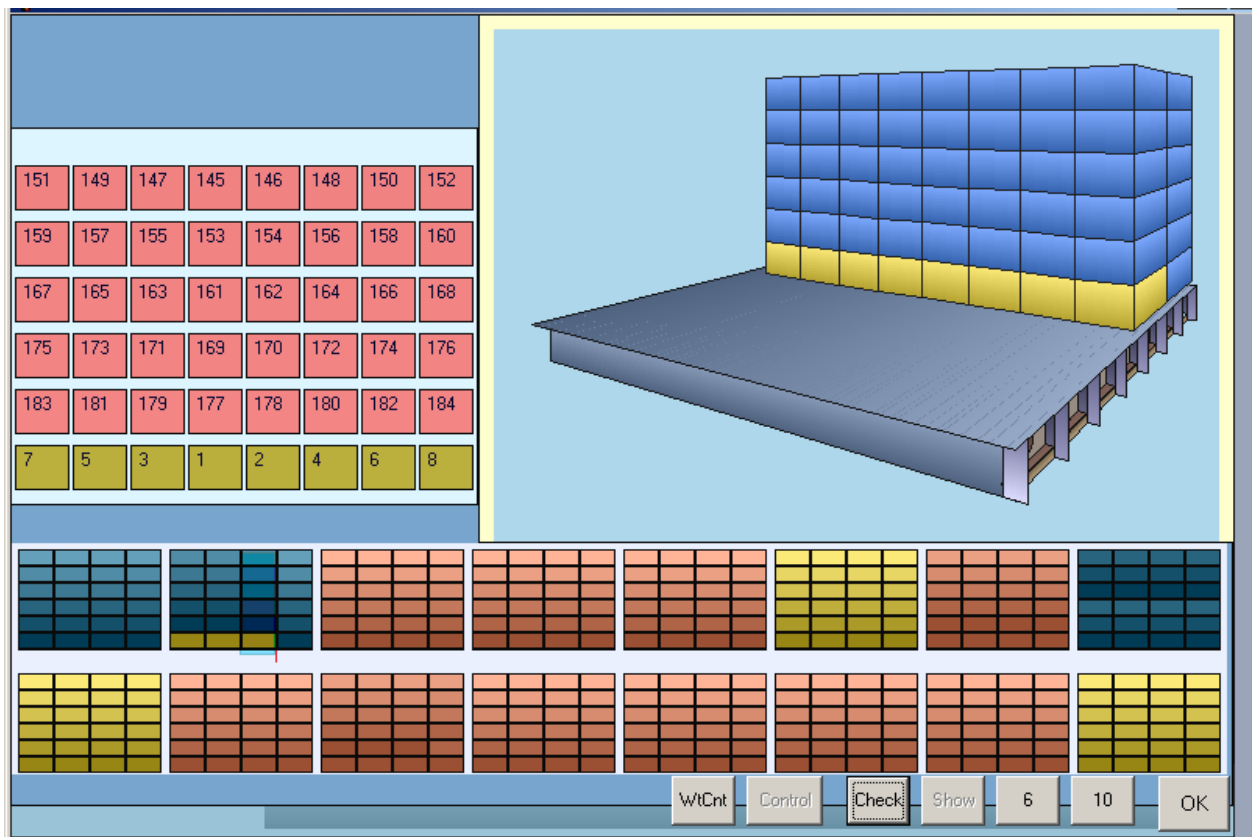


Рисунок 5.32 – Відображення другого бею кришки другого трюму

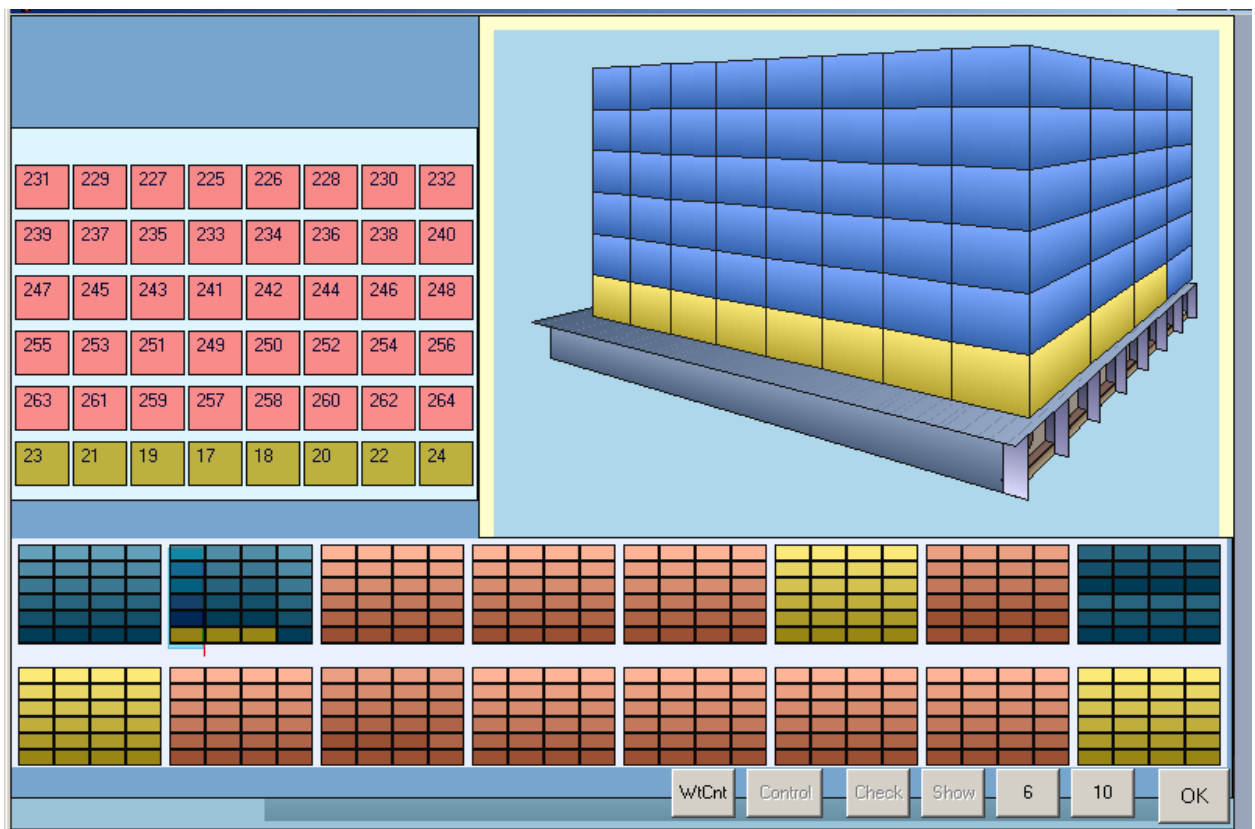


Рисунок 5.33 – Відображення четвертого бею кришки другого трюму

5.5 Висновки за п'ятим розділом

У п'ятому розділі розглянутий окремий випадок завантаження судна контейнерами, коли перевозиться одна партія контейнерів максимальної ваги з одного порту в інший. Отримані процедури розміщення контейнерів партії по судновим вантажним приміщенням, під час якого виконуються вимоги щодо остійності, загальної поздовжньої міцності і посадки судна. Наведено аналітичні вирази, реалізовані в згаданих процедурах.

Представлені результати імітаційного моделювання завантаження судна «Скай Джемені», що здійснює рейс з заходом в п'ять портів і перевезенням чотирьох партій вантажу. Для кожного з чотирьох завантажень судна показано розподіл контейнерів по вантажних приміщеннях і визначені параметри посадки, остійності та загальної поздовжньої міцності.

Запропоновано процедуру відображення плану розміщення контейнерів у вантажних приміщеннях судна за допомогою імітаційної програми.

ВИСНОВКИ

1. Оцінка стану питання. Підвищенням 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 торговельного флоту. До таких питань відноситься забезпечення морехідного стану судна, яке у визначальній мірі залежить від коректності його завантаження.

При завантаженні 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.

2. Формулювання вирішеної наукової задачі, її значення для науки і практики. В результаті вирішення головної наукової задачі отримано новий метод 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 розроблено спосіб визначення контейнеру, на який діє максимальна сила інерції качки, 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.

3. Висновки і рекомендації щодо наукового та практичного використання отриманих результатів. Основні теоретичні і практичні результати, отримані в дисертації, можуть бути впроваджені на судна, що перевозять контейнери, для оптимізації планування їх рейсового завантаження, а також використані в практичній роботі агентських, суднохідних, кріюінгових та інших компаній. Також можуть бути використанні в процесі навчання і підвищення кваліфікації судноводіїв.

4. Якісні та кількісні показники отриманих результатів. Якісним показником результатів дисертаційної роботи є можливість підвищення морехідної безпеки контейнеровозів та їх економічної ефективності. Мінімізація кількості баласту при завантаженні судна контейнерами характеризує кількісний показник.

5. Обґрунтування достовірності отриманих результатів.

Достовірність результатів дисертаційної роботи обґрунтовується розробкою математичних моделей та результатами, одержаними під час імітаційного моделювання теоретичного дослідження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аксютин Л.Р. Грузовой план судна. / Аксютин Л.Р. – М.: Транспорт, 1976. – 112 с.
2. Воробьев Ю.Л. Гидродинамика судна в стесненном фарватере. / Воробьев Ю.Л. – СПб.: Судостроение, 1992. – 224 с.
3. Крылов А.Н. Теория корабля. / Крылов А.Н. – М.: Военмориздат, 1942 – 412 с.
4. Кацман Ф.М. Теория и устройство судов. / Кацман Ф.М., Дорогостайский Д.В., Конов А.В., Коваленко Б.П. – Л.: Судостроение, 1991. – 416 с.
5. Мельник В.Н. Эксплуатационные расчеты мореходных характеристик судна. / Мельник В.Н. - М.: Транспорт, 1990. – 142 с.
6. Справочник по теории корабля. Т.2. Под редак. Войтунского С.И. - Л.: Судостроение, 1985. – 440 с.
7. Сизов В.Г. Теория корабля. / Сизов В.Г. – Одесса: Феникс, 2003. – 282 с.
8. Жуков Ю.Д. Пути снижения аварийности малых судов. / Жуков Ю.Д. //Проектирование судов и судов. устройств, Николаевс. кораблестроит. ин-т. – Николаев. - 1991. - С. 77-85.
9. Бугаев В. Н. Системный способ расчета непотопляемости судна. / Бугаев В. Н. //Тез. докл. науч.-техн. конф. «Пробл. обеспеч. живучести кораблей и судов» НТО судостроителей им. акад. А. Н. Крылова. - СПб, 1992. - С. 35-36.
10. Соломенцев О.И. Нормативы аварийной остойчивости морских катамаранов. / Соломенцев О.И. // Тез. докл. науч.-техн. конф. «Проблемы обеспечения живучести кораблей и судов», НТО судостроителей им. акад. А. Н. Крылова. - СПб, 1992. - С. 36 - 38.
11. Васюнькин В.В. Динамическая модель состояния корабля при борьбе за непотопляемость. / Васюнькин В.В., Шумаев М.Ю.// Тез. докл.

науч.-техн. конф. «Проблемы обеспечения живучести кораблей и судов», НТО судостроителей им. акад. А. Н. Крылова. - СПб, 1992. - С. 38-40.

12. Кучер Ю.П. Об альтернативных требованиях к остойчивости. / Кучер Ю.П., Рябченко В.К. // Судовождение. – № 2. – 2000. – С. 133 – 137.

13. Гуральник Б.С. Точность определения остойчивости рыболовных судов расчетным методом. / Гуральник Б.С, Кулагин В.Д. // Судостроение (С.-Петербург). -1992.- № 6 .- С. 9-12.

14. Гуральник Б.С. Учет факторов старения при обеспечении безопасности рыболовных судов. / Гуральник Б.С, Кулагин В.Д. // Тез. докл. науч.-техн. конф. «Проблемы обеспечения живучести кораблей и судов», НТО судостроителей им. акад. А. Н. Крылова. - СПб, 1992. - С. 40-42.

15. Восковщук Н.И. Определение остойчивости судна при больших наклонениях в начальной стадии проектирования. / Восковщук Н.И., Князев В.В. // Тр. Дальневост. гос. техн. ун-та. – 1994. - №113. – С. 28-32.

16. Способ контроля остойчивости судна. Пат. 2091269 Россия, МКИ6 В 63 В 39/14 / Нечаев Ю.И., Васильева Э.Ю. - № 94030622/11; Заявл. 18.8.94; Опубл. 27.9.97, Бюл. № 27.

17. Бондарь В.М. О модели поведения одной разновидности подвижного груза при качке судна. / Бондарь В.М. // Судовождение. – № 1. – 1999. – С. 7 – 14.

18. Вакс А.И. Определение параметров статической посадки корабля на волнении/ Вакс А.И., Куров Б.Н. // Судостроение (С.-Петербург). – 1997. - №3. – С. 14-17.

19. Егоров Г.В. Нормативные требования к конструкции корпусов судов, предназначенных для перевозки опасных грузов по европейским внутренним водным путям. / Егоров Г.В. // Судовождение. – № 5. – 2000. – С. 34 – 44.

20. Козляков В.В. Автоматизированный расчет грузового плана и непотопляемости судна на бортовой ПЭВМ. / Козляков В.В., Егоров Г.В. //

Проектир. судов и судов. устройств. Николаев. кораблестроит. ин-т. - Николаев, 1992. - С. 55—63.

21. Система автоматизированного контроля напряжений в корпусе судна: Пат. 2097718 Россия, МКИ6 G 01 L 1/22 / Гири́н С.Н., Амелы́ченко А.А., Абрамов Г.А. - № 93055056/28: Заявл. 13.12.93; Опубл. 27.11, Бюл. № 33.

22. Вичев А.Ф. Оценка достоверности прогноза долговечности узлов. / Вичев А.Ф., Стельмашук В.Н., Корнилов В.К. // Строит. мех. корабля, Николаевс. кораблестроит. ин-т., Николаев. - 1991. - С. 32 - 44.

23. Рябченко В.К. Грузовая шкала для определения водоизмещения и осадок при значительном дифференте. / Рябченко В.К. // Судовождение. – № 2. – 2000. – С. 175 – 177.

24. Бойцов Г.В. Метод расчета напряжений и деформаций при скручивании широко раскрытых судов / Бойцов Г.В. // Тр. ЦНИИ им. адм. А. Н. Крылова. – 1996. - № 3. – С. 24-27.

25. Александров А.В. Программный комплекс для расчета общего напряженного состояния корпусов скоростных судов / Александров А.В., Бабури́н А.Ю., Булгаков А.А., Шишени́н А.Е. // Тр. ЦНИИ им акад. А.Н. Крылова. – 1996. - № 3. – С. 44-48.

26. Шаньгин И. Д. Экспериментальное исследование несущей способности балок при различных вариантах подкрепления вырезов в стенках. / Шаньгин И. Д. // Сб. науч. тр. ин-т инж. вод. трансп. - 1991. - № 261. - С. 28 - 39.

27. Брикер А.С. Оценка местной прочности корпуса судна. / Брикер А.С., Неклюдов С.Ю., Неклюдова С.А. // Судостроение и судоремонт: Сб. научн. тр. С-Петербург, гос. универ. водн. коммун. СПб.: 1999. - С. 61-66.

28. Родионов А. А. Исследование математических моделей оптимизации судовых конструкций. / Родионов А. А. // Судостроение (С.-Петербург). - 1992. - № 8-9. - С. 6-10.

29. Микитюк В.Е. Определение прочности замкового соединения «локал» с учетом сплошной кромки панели. / Микитюк В.Е., Кипреев Ю.Н.,

Иванов Д.Ю.// Виброакуст. динам. и прочн. судов. – Николаевс. корабле-строит. ин-т., Николаев. - 1991. – С. 3 - 7.

30. Егоров Е.Г. Учет гибкости корпуса при расчетах посадки и элементов изгиба судна. / Егоров Е.Г.// Автоматизация судовых технических средств. – 2004. – № 9. – С. 37 – 45.

31. Петин С.В. Расчетная оценка усталости узлов корпуса в компьютерной системе контроля прочности конструкций. / Петин С.В., Ермолаева Н.С. // Судостроение (С.-Петербург). - 1992. - № 8-9. - С. 10-12.

32. Кучер Ю.П. К уточнению расчета водоизмещения и количества груза по осадкам. / Кучер Ю.П., Рябченко В.К.// Судовождение. – 2004. - № 7. – С. 41- 46.

33. Ромакчук Н.Н. Методика расчета стержневых систем с учетом податливости узловых соединений. / Ромакчук Н.Н., Жавдович К.Г. // Энерг. стр-во. - 1992. - № 8. - С. 59 - 62.

34. Цымбал Н.Н. Расчет границ множества допустимых стратегий проведения грузовых операций навалочных судов. / Цымбал Н.Н., Васьков Ю.Ю. // Судовождение. – 2004. - № 8. – С. 22 - 31.

35. Пономаренко Ю.Л. Оптимизация загрузки транспортных средств, осуществляющих коммерческие перевозки. / Пономаренко Ю.Л. // Збірник доповідей 4-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Ринок послуг комплексних транспортних систем та прикладні проблеми логістики». – К.: НТУ, 2002. -С.265-269.

36. Васьков Ю.Ю. Некоторые вопросы оптимизации грузовых операций навалочных судов. / Васьков Ю.Ю. // Судовождение. – № 6. – 2003. – С. 40 – 45.

37. Бекерский В.И. Оперативный расчет крепления грузов на морских судах. / Бекерский В.И., Богданов Б.П. // Судовождение. – № 4. – 2002. – С. 26 – 31.

38. Заичко В.С. Специфика учета ограничений по грузовместимости трюмов при загрузке судов генеральными грузами. / Заичко В.С. // Судовождение. – 2005. - № 10. – С. 53 – 57.

39. Заичко В.С. Особенности формирования загрузки судов генеральными грузами. / Заичко В.С. // Судовождение. – 2005. - № 9. – С. 25 - 28.

40. Заичко В.С. Алгоритм формирования множества допустимых загрузок судна генеральными грузами. / Заичко В.С. // Судовождение. – 2006. - № 12. – С. 59 – 62.

41. Заичко В.С. Моделирование укладки генеральных грузов в трюма судна. / Заичко В.С. // Судовождение. – 2006. - № 11. – С. 51 – 55.

42. Заичко В.С. Отношение предпочтения партий генерального груза по доходности их перевозок. / Заичко В.С. // Судовождение. – 2007. - № 14. – С. 35 – 38.

43. Цымбал Н.Н. Выбор оптимального варианта проведения грузовых операций навалочных судов. / Цымбал Н.Н., Васьков Ю.Ю. // Автоматизация судовых технических средств. – 2004. – № 9. – С. 103 – 107.

44. Цымбал Н.Н. Формирование оптимизационной задачи проведения грузовых операций навалочных судов. / Цымбал Н.Н., Васьков Ю.Ю. // Судовождение. – 2004. - № 7. – С. 3 - 9.

45. Стоян Ю.Г. Размещение геометрических объектов. / Стоян Ю.Г. – К.: Наук. думка, 1975. – 237 с.

46. Стоян Ю.Г. Алгоритм приближенного решения задачи плотнейшей упаковки набора параллелепипедов в параллелепипеде с областями запрета. / Стоян Ю.Г., Пономаренко Л.Д. // Автоматика и вычислительная техника. – 1975. - № 1. – С. 46-54.

47. Аносов А.П. Оценка пластических деформаций по изменению магнитной проницаемости. / Аносов А.П. // Тр. Дальневост. гос. техн. ун-та. – 1994. - №113. – С. 3-7.

48. Савчук В.Д. Обеспечение безопасной перевозки цемента насыпью на балкерах. / Савчук В.Д., Клименко Е.Н. // Судовождение. – 2004. - № 7. – С. 72- 75.

49. Миврезов А. Я. Анализ повреждений судов при контактах. / Миврезов А. Я. // Проект-тир. судов и судов. устройств. - Николаевс. кораблестроит. ин-т., Николаев. - 1991. – С. 40 - 46.

50. Коротков Б.П. Динамическая система контроля и обеспечения безопасности судов в штормовом море. / Коротков Б.П., Модников В.П., Терехович Э.Ю. // Судостроение (С.-Петербург). – 1996. - № 7. – С. 4-10.

51. Крючков Ю. С. Влияние контактных деформаций узлов крепления на динамику судового оборудования при траверзном ударном воздействии. / Крючков Ю. С. // Виброакуст. динам. и прочн. судов. – Николаевс. кораблестроит. ин-т., Николаев. - 1991. – С. 7 - 14.

52. Егоров Г.В. Идентификация опасностей и меры по снижению риска при смене балласта существующими судами в море. / Егоров Г.В. // Судовождение. – № 3. – 2001. – С. 64 – 75.

53. Гирин С.Н. Анализ влияния спектра волнения на величину волнового изгибающего момента в корпусе судна. / Гирин С.Н., Фролов А.М. // Тр. Волж. гос. акад. вод. трансп. – 1999. - № 283, ч. 6. – С. 39-43.

54. Лукин В.А. Статистический анализ данных о повреждении судовых корпусных конструкций. / Лукин В.А. // Производство судов и судов. устройств, Николаевс. кораблестроит. ин-т., Николаев. - 1991. - С. 23 - 29.

55. Бех Л.П. Опыт и перспективы использования на судах системы непрерывного контроля напряженного состояния корпуса судна / Бех Л.П., Гирин С.Н., Штнйн Е.Р. // Тр. Волж. гос. акад. вод. трансп. – 1999. - № 283, ч. 6. – С. 8-14.

56. Егоров Г.В. Моделирование риска при переломах корпусов судов системы Дунай-Майн-Рейн. / Егоров Г.В. // Автоматизация судовых технических средств. – 2001. – № 6. – С. 24 – 34.

57. Крыжевич Г.Б. Особенности обеспечения безопасности и ресурса конструкций СДПП, имеющих эксплуатационные ограничения по интенсивности волнения. / Крыжевич Г.Б.// Тр. ЦНИИ им акад. А.Н. Крылова. – 1996. - № 3. – С. 53-59.

58. Иванов А. В. Влияние поперечной нагрузки и начального прогиба продольных ребер на предельный изгибающий момент корпуса судна. / Иванов А. В.// Сб. науч. тр. Ин-т инж. вод. трансп. - 1991. - № 261. - С. 50-67.

59. Крыжевич Г. Б. О запасах местной прочности корпусов судов новых типов. / Крыжевич Г. Б.// Судостроение (С.-Петербург). - 1992. - № 8-9. – С. 3 - 6.

60. Трянин И.И. Методологические основы расчета прочности соединительной конструкции катамаранов внутреннего плавания. / Трянин И.И. Пряничников К.Н., Трубина В.С. //Сб. науч. тр. ин-т инж. вод. трансп. - 1991. - №261. - С. 3 - 13.

61. Головешкин Ю.В. Третья проблема строительной механики корабля (нормирование прочности). / Головешкин Ю.В. // СПб.: Судостроение. - 1999. – 153 с.

62. Егоров Г.В. Изгиб сильно поврежденного корпуса судна. / Егоров Г.В. // Судовождение. – № 2. – 2000. – С. 50 – 62.

63. Новые принципы нормирования прочности судов // Судостроение (Санкт-Петербург). - 2003. - № 4. - С. 9-10.

64. Бурдун Е.Т. Модель напряженно-деформированного соединения сферопластика при осевом сжатии. / Бурдун Е.Т., Гоиовченко Ю.Б.// Виброакуст. динам. и прочн. судов. – Николаевс. кораблестроит. ин-т., Николаев. - 1991. – С. 40 - 46.

65. Коростылев Л. И. О долговечности конструктивных узлов судового корпуса при циклических нагрузках. / Коростылев Л. И. // Строит. мех. корабля, Николаевс. кораблест. ин-т.- Николаев. - 1991. - Р. 24—31.

66. Гирин С.Н. Прочность ребер жесткости при ударе грейфера. / Гирин С.Н. // Сб. науч. тр. ин-т инж. вод. трансп. - 1991. - № 261. - С. 14-27.
67. Цветков Ю.Н. Кавитационная стойкость медных сплавов, применяемых для изготовления гребных винтов. / Цветков Ю.Н., Погодаев Л.И.// Судостроение. -1991.- № 9. - С. 32-35.
68. Каменских И.В. Устойчивость сложных судовых конструкций. / Каменских И.В.// Материалы 26 Научн.-техн. конф. Комс.-на-Амуре гос. техн. ун-та. Комсомольск-на-Амуре, 4-26 апр. 1996. Ч.1. – С. 103-109.
69. Суров О.Э. Влияние проектных характеристик судна на его мореходные и прочностные качества. А-реф. канд. техн. наук. Дальневост. гос. техн. университет. Владивосток, 2000, 27 с.
70. Апполонов Е. М. Проектирование конструкций ледовых утолщений по критерию предельной прочности. / Апполонов Е. М.// Судостроение (С.-Петербург). - 1992. - № 2. - С. 9 - 13.
71. Егоров Г.В. Развитие требований к средствам контроля загрузки морских и смешанного плавания судов. / Егоров Г.В. // Автоматизация судовых технических средств. – 2000. – № 5. – С. 36 – 53.
72. Барабанов Н.В. Оценка напряженного состояния балочно-ферменных конструкций двойных бортов при ледовых нагрузках. / Барабанов Н.В., Беловицкий Е.М. // Судостроение (С.-Петербург). – 1996. - № 8-9. – С. 6-10.
73. Егоров Г.В. Обобщение опыта оценки физического состояния судов по процедуре САР. / Егоров Г.В. // Автоматизация судовых технических средств. – 2002. – № 7. – С. 43 – 56.
74. Чепок А.О. Выбор стратегии загрузки судна генеральными грузами с учетом их укладки./ Чепок А.О., Цымбал Н.Н. // Судовождение. – 2009. - № 16. – С. 137-141.
75. Чепок А.О. Выбор типов генеральных грузов при моделировании их укладки в грузовые помещения судна./ Чепок А.О. // Судовождение. – 2009. - № 17. – С. 233-238.

76. Николаева Л.Л. Моделирование укладки генеральных грузов в грузовые помещения судна. / Николаева Л.Л., Чепок А.О. // Судовождение: Сб. научн. трудов / ОНМА, Вып. 18 – Одесса: «ИздатИнформ», 2010 – с. 143-150.

77. Чепок А.О. Отображение параметров посадки, остойчивости и общей продольной прочности в грузовой компьютерной программе судна. / Чепок А.О. // Судовождение. – 2011. - № 19. – С. 163-169.

78. Чепок А.О. Разработка процедуры отображения укладки генерального груза в трюмах судна / Чепок А.О. // Судовождение. – 2011. - № 20. – С. 146-149.

79. Гайченя А.В. Программное описание стандартных грузовых помещений /Гайченя А.В. // Судовождение. – 2009. - № 17. – С. 37- 40 .

80. Николаева Л.Л. Способ формализации формы судовых грузовых помещений нестандартного типа/ Николаева Л.Л., Гайченя А.В. // Автоматизация судовых технических средств. – 2010. - № 16. – С. 71-82.

81. Гайченя А.В. Ввод в базу данных характеристик судна. / Гайченя А.В.// Судовождение: Сб. научн. трудов / ОНМА, Вып. 18 – Одесса: «ИздатИнформ», 2010 – с. 64-67.

82. Соколов М.Ю. Общий вид зависимостей параметров посадки, остойчивости и прочности судна от исходных данных / Соколов М.Ю. // Судовождение. – 2009. - № 17. – С. 199-204.

83. Соколов М.Ю. Метод формирования грузовой программы судна с использованием ранее созданной базы данных. / Соколов М.Ю. // Судовождение: Сб. научн. трудов / ОНМА, Вып. 18 – Одесса: «ИздатИнформ», 2010 – с. 169-172.

84. Николаева Л.Л. Разработка метода оперативной оценки критериев мореходности судна./ Николаева Л.Л., Гайченя А.В., Соколов М.Ю. // Судовождение. – 2009. - № 16. – С. 132-136.

85. Гайченя А.В. Ввод информации о танках в базу данных судна. / Гайченя А.В.//Судовождение: Сб. научн. трудов / ОНМА, Вып. 19 – Одесса: «ИздатИнформ», 2011– с. 61- 65.

86. 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.

87. 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.

88. Власенко Е.А. Некоторые особенности составления грузового плана контейнеровозов. / Власенко Е.А., Цмбал Н.Н. // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, - 2018. - Вып. 28. – С. 35-41.

89. 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.

90. Власенко Е.А. Безопасная перевозка груза с учетом качки судна. / Власенко Е.А. // Автоматизация судовых технических средств. – 2018. – № 24. – С. 19-26.

91. 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.

92. 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.

93. 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.

94. 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.

95. Власенко Е.А. Имитационное моделирование загрузки контейнеровоза. / Власенко Е.А., Калиниченко Е.В., Цымбал М.Н. // Austria - science, Issue: 26, 2019.- С. 43 - 49.

96. Han C.P. A heuristic approach to the three dimensional cargo loading problem. / Han C.P., Knott K., Egbelu P.J. // Intern. J. of Production Research and Development. – 1989. – 16.- P. 462-469.

97. Gehring H. A computer based heuristic for packing pooled shipment container. / Gehring H., Menscher H., Meyer M. // Europ. J. of Operational Research. - 1990. – 44. –P. 277-289.

98. Umeda Naoya. Kansai dzosen kekaisi. Kansai Soc./ Umeda Naoya, Arijii Minoru, Yama-Koshi Yasuyuki // Nav. Archit., Jap. – 1991. - № 216. - P. 129 – 138.

99. MAST's user-friendly stability programs // Nav. Archit. - 1992. - Apr. - P. E203.

100. Влияние свободной циркуляции воды в аварийном отсеке на остойчивость судна. /Ren Kongyu. Chuanbo gongcheng // Ship Eng.- 1992. - № 4. - P.4-7.

101. Remen Webjorn. The development of GRP sandwich in MCMV construction. / Remen Webjorn. // Nav. Archit. - 1992. - June. - P. E332 - E333.

102. Te Ye. Hiroshima daigaku kogakubu kenkyu hokoku./ Te Ye. // Bull. Fac. Eng. Hiroshima Univ. - 1992. - 41, №1. - P. 111-112.

103. Chen Wen-Hsiang. Effect of temperature on the contact stresses and residual bearing strength of pin loaded composite laminates/ Chen Wen-Hsiang, Lee Ya-Jung. // Therm. Stresses. - 1992. -15, №3.- P. 419-437.

104. Yang Chengoan. Chuanbo gongcheng./Yang Chengoan, Qin Ping.// Ship. Eng.- 1992.-№ 3.- P. 43-48.

105. Strait Larry H. Effects of seawater immersion on the impact resistance of glass fiber reinforced epoxy composites. / Strait Larry H., Karasek Mark L, Amateau Maurice F. // Compos. Mater. - 1992.- 26, №14. - P. 2118-2133.

106. An owner's approach to VLCC structural performance management // Mar. Archit. - 1992.- June. - P. E314-E316, E318.

107. Tang Yongang. Chuanbo gonycheny. / Tang Yongang, Pan Yonhao, Xu Hui, Jiang Zongbao. //Ship. Eng. - 1992. - №5. – P. 13 – 16.

108. Miller Lutz. Advanced calculation techniques for ship structural design. / Miller Lutz. // Germ. Maritime Ind. J. - 1992. - 8, Spec. Issue. - P. 37 - 40.

109. Simonovich Milivoje. The correlation of ship hull form and her static stability diagram. / Simonovich Milivoje, Sizov Victor G, Vorobjov Yuri L. // 21 Jugosloven. kongr. teor. i primenjene meh., Nis. 29 maj – 3 jun. - 1995. - P. 167-173.

110. Компьютерное исследование конструкционной надежности судна. Computer investigation of construction reliability / Kulesh Victor A. // Proc. 6th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., Los Angeles, Calif., May 26-31, 1996. Vol. 4. – Golden (Golo), 1996. – p. 395-401.

111. RO-RO ship/ferry with buoyancy tanks to prevent capsizing/ Заявка 2264665 Великобритании МКИ6 В 63 В 43/12 / Shatawy Ahmed El. - № 9422061.3; Заявл. 2.11.94; Опубл. 8.5.96; НКИ В7А.

112. Marine vessels having cutboard sponsors. Заявка 2305400 Великобритании, МКИ6 В 63 В 43/14 / Gee Nigel Ian, Dudson Edvard

Robertson Peter, Nigel Gee and Associates Ltd; Norasia Servise SA. - № 9612810.3; Заявл. 19.6.96; Опубл. 9.4.97; НКИ В7А.

113. Остойчивость неповрежденных двухкорпусных танкеров. Intact stability of double hull tankers // HSB Int. Holl. Shipbuild. – 1997. – 45, № 11/ - P. 58-59.

114. Конструкционные расчеты и система программирования расчетов крупнотоннажных танкеров / Xiao Xi, Guo Jun. Wang Fuhua // Shanghai jiaotong daxue xuebao. Shanghai Jiaotong Univ. - 1997. - 31, № 11. - P. 18-23.

115. Вероятностное интегрирование конструкционной надежности с неравномерно распределенными параметрами / Zhang Li // Shanghai jiaotong daxue xuebao. Shanghai Jiaotong Univ. – 1997. – 31, № 11. – P. 145- 148.

116. Вероятностный расчет остойчивости поврежденного судна и его влияние на разделение корпуса судна на отсеки / Hu Tienin // Shanghai jiaotong daxue xuebao. Shanghai Jiaotong Univ. - 1997. - 31, № 11. - P. 24-29.

117. Устройство для обеспечения дополнительной плавучести судна. Buoyancy systems for marine craft. Заявка 2332653 Великобритании, МПК6 В 63 В 43/14/Alswaidan Abdalmohsen Ibrahim, Alameen Wedatala Mohamed. – № 9727344.5; Заявл. 24.12.1997; опубл. 30.06.1999; НПК В 7 А.

118. Критическое, грозящее опрокидыванием, положение судна в условиях параметрического резонанса при попутном волнении. Huang Yanshun, Xu Hui, Hu Yunchang. // Chuanbo lixue. - 1999. - 3 № 5. - P. 27-33.

119. Динамическая модель бортовой качки накатных судов при затоплении части внутренних помещений. A dynamic model for roll motion of ships due to flooding/ Xia Jinzhu, Jensen Jorgen, Pedersen Preben Terndrup // Schiffstechnik. – 1999. – 46, № 4. –P. 208-216.

120. Chang Bor-Chau. On the damage survivability of Ro-Ro ships investigated by motion simulation in a seaway. / Chang Bor-Chau. // Schiffstechnik. – 1999. – 46, № 4. – P. 192-207.

121. Hull structure strength calculations // HSB Int. - 1999. - 48, № 2. - P. 70-71.

122. Zhu Li-ping, Zhang Shang-kun. Shanghai jiaotong daxue xuebao // Shanghai Jiaotong Univ. – 1999. – 33, № 3. – P. 365-367.
123. Xu Xiangdong, Yan Chunwen, Peng Hingning / Chuanbo lixue. 1999. – 3, № 1. P. 63-71.
124. Making bulkers better by design // Nav. Archit. – 2003. - July-Aug. - P. 8.
125. Rickmers Shanghai: fourth Rickmers heavy-lift ship delivered // Nav. Archit. - 2003. – May. - P. 28.
126. SENSFIB fiber optic hull stress monitoring system. HSB Int. 2003. 52. № 5, p. 48-50.
127. Wan Zheng. Estimation of ultimate strength of ship`s hull girders. / Wan Zheng, He Fu. // Ship Mech. - 2003. - 7, № 3. - P. 58-67.
128. Shih Chan Ik. Seibu zosenkai kaiko./ Shih Chan Ik, Isono Takao, Yamamoto Hirotaka. //Jap. Soc. Nav. Archit. 2003. № 106 P. 69-75.
129. Chepok A.O. Determination of inertia forces acting on break bulk cargo en route / Chepok Oleksii // Constanta Maritime University Annals, Issue Year XIV, Issue 20. – Constanta : Editura Nautica, 2013. – pp. 63–65.
130. Чепок А.О. Аналитическое определение сил инерции, действующих на груз при качке судна / Чепок А.О. // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия «Морская техника и технология» : Научный журнал. – 2014. – № 1 (февраль). – Астрахань: типография АГТУ, 2014. – С. 43–47.
131. Исследование операций. Т.1. Методологические основы и математические методы. Под редакцией Дж. Моудера. – М.: Мир, 1981. – 712 с.
132. Цымбал М.Н. Формирование тензора загрузки контейнеровоза в случае проведения грузовых операций в нескольких портах. / Цымбал М.Н. // Судовождение: Сб. научн. трудов НУ «ОМА», - 2019. - Вып. 29. – С. 35-41.
133. Цымбал М.Н. Расчет рейсового грузового плана контейнеровоза. / Цымбал М.Н. // Судовождение: Сб. научн. трудов НУ «ОМА», - 2020. - Вып. 30. – С. 144 – 151.

134. Цимбал М.М. Формування плану завантаження контейнеровозу. / Цимбал М.М. // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2020. – № 1(22). – С. 64 - 73.

135. 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.

136. 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.

137. 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.

138. 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.

139. 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.

ДОДАТОК А.

Список публікацій здобувача та відомості про апробацію результатів дисертації

1. Цымбал М.Н. Формирование тензора загрузки контейнеровоза в случае проведения грузовых операций в нескольких портах. / Цымбал М.Н. // Судовождение: Сб. научн. трудов НУ «ОМА», – 2019. – Вып. 29. – С. 35–41.
2. Цымбал М.Н. Расчет рейсового грузового плана контейнеровоза. / Цымбал М.Н. // Судовождение: Сб. научн. трудов НУ «ОМА», – 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.

Відомості про апробацію результатів дисертації.

Основні результати і положення роботи доповідалися, обговорювалися 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, 14-15 листоп. 2019 р.), XI Міжнародна науково - практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2019)» (Херсон, 28 - 30 травня 2019 р.), науково-технічна конференція «Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» (Одеса, 15-16 листопада 2020 р.) і XII Міжнародна науково - практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2020)» (Херсон, 27 - 29 травня 2020 р.).

ДОДАТОК Б.

АКТИ УПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ



А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня Цимбал Марії Миколаївни на тему «Розробка методу рейсового планування оптимального завантаження контейнеровозу» у навчальному процесі НУ «ОМА»

Ми, що нижче підписалися, начальник навчального відділу Пархоменко М.М., завідуючий кафедрою морських перевезень, склали цей акт в тому, що результати кандидатської дисертації здобувача наукового ступеня Цимбал Марії Миколаївни на тему «Розробка методу рейсового планування оптимального завантаження контейнеровозу» впроваджені у навчальний процес кафедри морських перевезень, у дисципліні «Експлуатація спеціалізованих суден», яку читають курсантам 4-го курсу спеціалізації 271.01 «Навігація і управління морськими суднами».

Начальник навчального відділу



Пархоменко М.М.

Завідуючка кафедри морських перевезень,
 професор



Ніколаєва Л.Л.



А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня Цимбал Марії Миколаївни на тему «Розробка методу рейсового планування оптимального завантаження контейнеровозу» у навчальному процесі Херсонської державної морської академії.

Ми, що нижче підписалися, начальник навчального відділу Струмінська Л. Ю., декан факультету судноводіння д.п.н., доцент Нагрибельний Я.А. і завідувач кафедри управління судном к.т.н., доцент Товстокорий О.М. склали цей акт в тому, що результати кандидатської дисертації здобувача наукового ступеня Цимбал Марії Миколаївни на тему «Розробка методу рейсового планування оптимального завантаження контейнеровозу» впроваджені у навчальний процес Херсонської державної академії в дисциплінах кафедри направлених на формування наступних компетентностей:

- контроль за посадкою, остійністю та напруженнями корпусу;
- планування та забезпечення безпечного завантаження, розміщення, кріплення, контролю під час рейсу та розвантаження вантажів.

Начальник навчального
відділу

 Л.Ю. Струмінська

Декан факультету судноводіння,
д. п. н., доцент

 Я.А. Нагрибельний

Завідувач кафедри управління судном
к. т. н., доцент

 О.М. Товстокорий

АКТ УПРОВАДЖЕННЯ

Цим актом підтверджується, що в компанії «СМА Шипс Україна» одержав упровадження в учбовий процес метод визначення контейнеру, на який діє максимальна сила інерції хитавиці, в залежності від завантаження судна для оцінки морехідної безпеки судна, який розроблений в дисертаційній роботі Цимбал Марії Миколаївни на тему «Розробка методу рейсового планування оптимального завантаження контейнеровозу».

Вищезазначений метод входить до навчальної програми перепідготовки старшого командного складу компанії.

Директор представництва
компанії «СМА Шипс Україна»

«29» 12 2020 г.



Тюпиков Е.Е.

А К Т ВПРОВАДЖЕННЯ

Цим актом підтверджується, що в компанії «Uniteam Marine» одержав впровадження метод забезпечення вимог морехідної безпеки судна шляхом оптимального розміщення партій контейнерів завантаження для прийому мінімальної кількості баласту, який запропонований в дисертаційній роботі Цимбал Марії Миколаївни на тему «Розробка методу рейсового планування оптимального завантаження контейнеровозу».

Метод викладається при перепідготовці судноводіїв компанії.

Директор представництва
компанії «Uniteam Marine»



Костин М.А.

«06» 01 2021 г.