

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

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Камєнєв Кирило Ігорович

УДК 629.123.03

АНОТАЦІЯ

до дисертації на тему

РОЗРОБКА МЕТОДУ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ СКЛАДАННЯ ВАНТАЖНОГО ПЛАНУ КОНТЕЙНЕРОВОЗУ З УРАХУВАННЯМ СТРУКТУРНИХ ТА ОПЕРАЦІЙНИХ ОБМЕЖЕНЬ

Спеціальність 271 – Річковий та морський транспорт

Галузь знань 27 – Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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



(підпис) К. І. Камєнєв

Науковий керівник:
Цимбал Микола Миколайович,
доктор технічних наук, професор

Одеса – 2022

АНОТАЦІЯ

Каменєв К. І. Розробка методу розв'язання задачі складання вантажного плану контейнеровозу з урахуванням структурних та операційних обмежень. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 271 – Річковий та морський транспорт (галузь знань 27 – Транспорт). – Національний університет «Одеська морська академія» Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2022.

Масова контейнеризація перевезень є однією з основних тенденцій, що враховуються національною транспортною стратегією України на період до 2030 року. Однією з її цілей є збільшення частки контейнерних перевезень та стимулювання розвитку контейнерних перевезень.

В той час, коли світовий контейнерний флот продовжує збільшуватися в розмірах і місткості, самі судна витрачають менше часу в портах на обробку контейнерів. Нещодавна пандемія змусила судноплавні компанії застосовувати політику скорочення витрат, яка включає зменшення об'ємів перевезень, призупинення послуг, перенаправлення суден тощо. Такі заходи накладають додатковий тиск на управління вантажними операціями з урахуванням типових щільних графіків контейнерних суден.

Дане дослідження присвячене підвищенню ефективності завантаження контейнерних суден при забезпеченні обмежень щодо морехідної безпеки на етапі підготовки попереднього вантажного плану.

Головною задачею дослідження є розробка методу підготовки вантажного плану контейнерних суден за певних обмежень.

Для її розв'язання були визначені такі **допоміжні задачі**:

1. Розробити математичну модель, яка би враховувала обрані критерії.
2. Обрати та модифікувати алгоритми укладання контейнерів відповідно до обмежень моделі.

3. Оптимізувати отримані розв'язки задачі з розміщення вантажів у трюмі щодо параметрів мореплавства.

Задача розв'язується за допомогою булевої математичної моделі у поєднанні з евристичними та метаевристичними методами, математична модель перевіряється за допомогою використання точного методу.

Наукова новизна дослідження визначається вищезазначеною математичною моделлю та методами, які враховують параметри, не охоплені раніше.

Робота складається із змісту, списку скорочень, вступу, шести розділів, висновку, списку використаної літератури та двох додатків.

У **розділу 1** розглядаються існуючі дослідження щодо морської безпеки та загальні напрямки їх розвитку. Далі розділ містить більш глибокий аналіз математичних моделей та методів, що використовуються дослідниками для розв'язання проблеми розподілу контейнерів на борту, та висвітлює їх переваги та недоліки. Ця проблема має назву MBPP (Master bay plan problem – основна проблема бей-плану), і в даний час є актуальною та часто розглядуваною темою. Існуючі дослідження можна розділити на дві категорії: ті, які намагаються повністю вирішити проблему, та ті, що розділяють її на складові частини.

В дослідженнях першої групи використовуються математичні моделі та алгоритми, що розгалужуються, для досягнення їх цілей. В дослідженнях другої групи задача зазвичай поділяється на дві частини. В першій частині контейнери розподіляються по певних кластерах, а в другій визначаються конкретні позиції контейнерів у таких кластерах.

Розділ 2 присвячений визначенню методології дослідження. В ньому визначається вибір напрямку дослідження, формулюється основне завдання та розподіл його на допоміжні завдання. У розділу 2 також перелічені використовувані методи.

Розділ 3 присвячений вищезазначеній математичній моделі. В ньому аналізуються структурні та експлуатаційні обмеження суден та контейнерів, а також вимоги до сегрегації небезпечних вантажів. У цьому розділі представлена

гнучка булева математична модель, яка складається з восьми нерівностей, що охоплюють визначені операційні та структурні обмеження і забезпечують наступне:

1. Усі необхідні контейнери завантажуються з урахуванням їх видів та типів вантажів.
2. Жодні два контейнери не займають одне і те ж місце.
3. FEU (forty-foot equivalent unit) контейнери займають два TEU (twenty-foot equivalent unit) слоти у вантажному просторі.
4. TEU контейнери не можна завантажувати поверх FEU контейнерів.
5. FEU контейнери не можна завантажувати поверх двох стеків TEU різної висоти.
6. Як TEU, так і FEU контейнери, можуть бути розміщені тільки над іншими контейнерами, або на палубі судна; вони не можуть парити у повітрі.
7. Контейнери, які містять небезпечні вантажі, охоплені Кодексом IMDG (International maritime dangerous goods code), належним чином сегреговані відповідно до правил.

Після визначення моделі пропонується метод перетворення обмежень моделі в матричну форму. Метод заснований на модифікованому алгоритмі сортувальної станції Е. Дейкстри та враховує конкретні значення параметрів моделі, такі як розміри судна, кількість контейнерів та ін.

Заключна частина розділу присвячена перевірці моделі за допомогою точного методу, заснованого на методі гілок та границь. Чисельний експеримент навмисно ускладняється шляхом штучного вибору ситуації з жорсткими обмеженнями, яка вимагає дуже лімітовані позиції розміщення контейнерів.

У розділу 4 представлений метод розв'язання розглядуваної задачі виконання обмежень. Після оцінювання існуючих алгоритмів для виконання завдання було обрано генетичний алгоритм.

Запропоновано спосіб кодування розв'язків для ефективного виконання схрещення та селекції.

Пропонується фітнес-функція, яка враховує загальну кількість неправильно розміщених контейнерів для кожної нерівності моделі.

Також запропоновано функцію схрещення, яка використовує повний набір координат розв'язків, що через специфіку задачі дозволяє уникати розв'язків, що не мають практичного сенсу.

Використання турнірного відбору зумовлено недоліками інших методів при розв'язанні поставленої задачі.

Враховуючи всі вищезазначені функції, пропонується генетичний алгоритм стаціонарного стану для розв'язання поставленої задачі виконання обмежень.

Розділ 5 присвячений аналізу морехідних властивостей судна, який враховує вимоги до параметрів остійності, передбачені ІМО (Міжнародна морська організація), місцевої та поздовжньої міцності, диференту та крену.

У цьому розділі представлено розроблений метод, заснований на генетичному алгоритмі, який дозволяє оптимізувати параметри морехідності. Для того, щоб розв'язок залишався незмінним щодо обмежень математичної моделі, алгоритм виконує лише обмін контейнерів з однаковими параметрами. Пропонується гнучка функція допасованості для вибору найбільш придатних розв'язків у залежності від конкретних вимог рейсу.

З метою мінімізації витрат часу, необхідного для розміщення контейнерів за алгоритмом, описаним у розділі 4, був розроблений метод початкового розміщення контейнерів. З цією метою була розроблена функція оцінки придатності доступних позицій для кожного нерозташованого контейнеру, яка враховує як обмеження моделі, так і параметри мореплавства.

Розділ 6 присвячений імітаційному моделюванню для аналізу результатів попередніх розділів. Імітаційне моделювання виконується з використанням реальних судових даних, що дозволяє перевірити практичне застосування розробленої моделі та розроблених методів.

Спочатку виконується послідовне завантаження 4 партій контейнерів, призначених для 4 портів, оптимізуючи кожен крок для досягнення бажаних

параметрів мореплавства. Експеримент показав ефективність методів, представлених у розділі 5.

Далі було обрано конкретний випадок, що вимагав використання алгоритму, описаного в розділі 4 даної роботи. Використання розробленого алгоритму показало задовільні (відповідно до математичної моделі) результати, що підтверджують придатність моделі та методу.

Нарешті, новий розв'язок було оптимізовано, надалі підтверджуючи ефективність алгоритму, представленого в розділі 5.

Розв'язання основних та допоміжних задач призвело до наукової позиції, яку можна сформулювати таким чином: підготовка плану укладання контейнерних суден може бути вдосконалена за допомогою уточненої математичної моделі.

Досягнуто наступні наукові результати:

- Розроблено вдосконалену булеву математичну модель, що охоплює структурні та експлуатаційні обмеження;
- Запропоновано метод розв'язання розглядуваної задачі виконання обмежень щодо розміщення контейнерів на борту судна;
- Розроблено метод оптимізації розміщення контейнерів щодо параметрів мореплавства, який використовує вагу, порт призначення, тип і клас небезпечного вантажу кожного окремого контейнера та відрізняється можливістю використовувати гнучку цільову функцію, яка може модифікуватися щодо окремих параметрів мореплавства у залежності від особливостей конкретного рейсу;
- Запропоновано метод початкового розміщення контейнерів з урахуванням структурних та експлуатаційних обмежень, а також параметрів мореплавства.

Практична цінність дослідження полягає у потенційному використанні результатів для складання вантажного плану контейнерних суден, при розробці програмного забезпечення для завантаження контейнерних суден, у навчальному процесі та для підвищення кваліфікації штурманів.

Ключові слова: контейнерне судно, вантажний план, оптимізація вантажного плану, булева математична модель, небезпечні вантажі, генетичний алгоритм.

Список публікацій за темою

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:

1. Камєнєва А. В., Камєнєв К. І. Розробка вантажної програми для контейнерного судна з урахуванням вимог Міжнародного морського кодексу з небезпечних вантажів // Наукові праці: науково-методичний журнал. - Вип. 296. Том 308 «Комп'ютерні технології». – Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. П. Могили, 2017, с. 94-99.
2. Камєнєва А. В., Камєнєв К. І. Використання адитивного алгоритму для розміщення небезпечних вантажів на контейнерному судні // Судовождение: сборник научных трудов. – 2018. – Вып. 28. – Одеса: НУ «ОМА», центр «Видавінформ», - с. 70-77.
3. Камєнєв К. І., Камєнєва А.В., Цимбал М. М. Розробка математичної моделі для задачі бей-плану з урахуванням черговості завантаження контейнерів // Судноводіння: науково-технічний збірник. – 2021. – Вып. 32. – Одеса: НУ «ОМА», центр «Видавінформ», – с. 34-45. DOI: 10.31653/2306-5761.32.2021.34-45

Статті у виданнях, проіндексованих у міжнародних наукометричних базах даних SCOPUS та Web of Science:

4. Kamieniev K. Construction of a mathematical model and a method for arranging hazardous cargoes on a containership / K. Kamieniev, A. Kamienieva, M. Tsymbal // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 6. – № 3 (102). – p. 20-27. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.183385.
5. M. Tsymbal, K. Kamieniev. Modified Integer Model for Solving the Master Bay Problem // the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. – 2021. – Vol. 15 No. 4. – Akademia Morska w Gdyni, – p. 749-753. DOI: 10.12716/1001.15.04.05.

Статті у інших іноземних виданнях:

6. Kamieniev K. Automation of constraints creation for master bay plan problem / K. Kamieniev, A. Kamienieva // Slovak international scientific journal. – 2020. – Vol. 2 (45). – p. 19-23.

7. Каменев К.И. Подготовка входных данных для решения основной проблемы бэй-плана. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VIII (29), Issue: 238, 2020. - с. 71 - 73.

Статті, опубліковані у збірниках матеріалів наукових конференцій:

8. Kamieniev K. Relative container layout constrictions for automated stowage planning / K. Kamieniev, E. Strakhov // 9th International conference “Science and society”. Hamilton, Canada – 2019. – p. 1048-1052.

ABSTRACT

Kamieniev K. I. Method development for solving the task of preparing a containership stowage plan considering structural and operational constraints. – Manuscript.

Thesis for a Philosophy doctor degree (PhD) in specialty 271 – River and sea transport (branch of knowledge 27 – Transport) – National University “Odessa Maritime Academy” of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2022.

Global containerization of transportations is one of the main tendencies taken into account by the Ukrainian national transport strategy for the period until 2030. One of its aims is to increase container transportation volumes and stimulate development of container transport.

As the world's container fleet continues to grow in size and capacity, the ships themselves spend less time in ports per container. The recent pandemic caused shipping companies to apply cost cutting policies, which include reducing capacity, suspending services, re-routing vessels and similar. Such measures apply additional pressure to cargo operations management considering the typical tight schedules of containerships.

The research is devoted to improving maritime shipping efficiency while satisfying safety constraints via optimizing the preloading stowage plan preparation.

The main task of the research is to develop a method for preparing a containership stowage plan under specified constraints. In order to solve it, it has been broken into the following **auxiliary tasks**:

1. To develop a mathematical model that would take into account chosen criteria.
2. To select and modify algorithms for stowing containers under the model's constraints.
3. To optimize the model's solutions for seaworthiness parameters.

The task is accomplished using a Boolean mathematical model in conjunction with heuristic and metaheuristic methods, the model is then checked using an exact method.

The **scientific novelty** in the research is determined by the mathematical model and methods mentioned above which consider several parameters not covered before.

The thesis consists of a table of contents, list of abbreviations, introduction, six chapters, conclusion, list of references and two annexes.

Chapter 1 examines existing research regarding maritime safety and general directions of its development. Furthermore, it contains a deeper analysis of the mathematical models and methods used by researchers for solving the problem of allocating containers onboard and highlights their advantages and flaws. The problem has been named MBPP (Master bay plan problem) and it is currently highly studied topic. Existing studies can be divided into two categories: those trying to solve the problem in full and those dividing it into smaller tasks.

The first category of studies uses mathematical models and branching algorithms to reach their targets. The second category studies are normally separated into two groups. The first group allocates sets of containers inside certain clusters while the second determines specific container positions within such clusters.

Chapter 2 focuses on determining the research's methodology. It includes selecting the research direction, formulating the main task and dividing it into auxiliary tasks. It also lists the methods used.

Chapter 3 is devoted to the abovementioned mathematical model. It analyses structural and operational constraints of vessels and containers and also segregation requirements for dangerous goods. The chapter presents a flexible Boolean mathematical model consisting of eight inequalities covering those operational and structural constraints that ensure the following:

1. All the necessary containers have been loaded considering their types and kind of goods.
2. No two containers occupy the same spot.
3. FEU (forty-foot equivalent unit) containers occupy two TEU (twenty-foot equivalent unit) slots in the cargo space.
4. TEU containers cannot be loaded on top of FEU containers.
5. FEU containers cannot be loaded on top of two TEU stacks of different heights.

6. Both TEU and FEU containers can only be located either on top of other containers or the ship's deck; they can't be suspended in air.
7. Containers containing dangerous goods covered by IMDG Code are properly segregated according to regulations.

After specifying the model, a method for transforming it to a matrix form is proposed. The method is based on a modified shunting-yard algorithm and considers specific values of the model's parameters, such as a ship's dimensions or containers numbers.

The final part of the chapter is devoted to checking the model using an exact method based on a branch-and-bound algorithm. The numerical experiment is specifically complicated by artificially selecting a situation with strict constraints dictating very limited container placement options.

Chapter 4 presents a method for solving the constraint satisfaction problem. After weighing available options, a modified genetic algorithm was selected to perform the task.

A solution coding method is presented which allows to effectively perform crossover and selection.

A fitness function is proposed that takes into account the total number of wrongly placed containers per inequality.

A crossover function is proposed that uses full sets of solutions' coordinates which, because of the task specifics, cuts nonsensical solutions.

A tournament selection is used due to other methods' disadvantages for the task.

Considering all of the abovementioned functions a steady-state genetic algorithm is presented for solving the constraint satisfaction problem.

Chapter 5 is devoted to analyzing a vessel's seaworthiness. It considers stability parameters requirements mandated by the IMO (International Maritime Organization), local and longitudinal strength, trim and heel.

A method based on a genetic algorithm is developed allowing to optimize a solution's seaworthiness parameters. In order to keep the solution unchanged regarding the mathematical model, the algorithm operates via only swapping containers with the

same parameters. A flexible fitness function is proposed for selecting the fittest solutions based on specific voyage requirements.

In order to minimize the time needed for placing the containers by the algorithm described in Chapter 4, a method of initial container placement was developed. For that purpose, a function assessing available positions' fitness per unlocated container was developed which takes into account both the model's requirements and seaworthiness parameters.

Chapter 6 is devoted to simulation modelling for analyzing the previous chapters' results. It is performed using a real ship's data which checks the developed model's and methods' practical application.

First a consecutive loading of 4 container consignments destined to 4 ports is performed, optimizing each step to achieve the desired seaworthiness parameters. The experiment showed effectiveness of the methods presented in Chapter 5.

After, a specific case was selected requiring usage of algorithm described in Chapter 4 of the thesis. Using the algorithm showed satisfactory (as per mathematical model) results confirming the model's and the methods' applicability.

Finally, the effectiveness of the algorithm presented in Chapter 5 was further confirmed by optimizing the new solution.

Solving the main and auxiliary tasks has resulted in a **scientific position** which can be formulated as the following: preparing a containership stowage plan can be improved using a refined mathematical model.

The following **scientific results** have been achieved:

- The development of an improved Boolean mathematical model covering structural and operational constraints
- A method for solving the container placement constraint satisfaction problem has been proposed
- A proposal of a method for further container placement optimization considering seaworthiness parameters has been developed
- A method for initial containers placement considering structural and operational restrictions as well as seaworthiness parameters has been proposed

The **practical value** of the study consists of its results' potential usage in stowage planning optimization, developing containership loading software, educational process and for advanced training of navigators.

Keywords: containership, stowage planning, stowage plan optimization, Boolean mathematical model, dangerous goods, genetic algorithm.

List of published works on the topic

Articles in scientific professional publications, listed in the list of scientific professional publications of Ukraine:

1. Каменєва А.В., Каменєв К. І. Розробка вантажної програми для контейнерного судна з урахуванням вимог Міжнародного морського кодексу з небезпечних вантажів // Наукові праці: науково-методичний журнал. - Вип. 296. Том 308 «Комп'ютерні технології». – Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. П. Могили, 2017, с. 94-99.
2. Каменєва А.В., Каменєв К. І. Використання адитивного алгоритму для розміщення небезпечних вантажів на контейнерному судні // Судовождение: сборник научных трудов. – 2018. – Вып. 28. – Одеса: НУ «ОМА», центр «Видавінформ», - с. 70-77.
3. Каменєв К. І., Каменєва А.В., Цимбал М. М. Розробка математичної моделі для задачі бей-плану з урахуванням черговості завантаження контейнерів // Судноводіння: науково-технічний збірник. – 2021. – Вып. 32. – Одеса: НУ «ОМА», центр «Видавінформ», – с. 34-45. DOI: 10.31653/2306-5761.32.2021.34-45.

Articles in publications indexed in SCOPUS and Web of Science databases:

4. Kamieniev K. Construction of a mathematical model and a method for arranging hazardous cargoes on a containership / K. Kamieniev, A. Kamienieva, M. Tsymbal // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 6. – № 3 (102). – p. 20-27. doi: 10.15587/1729-4061.2019.183385.
5. M. Tsymbal, K. Kamieniev. Modified Integer Model for Solving the Master Bay Problem // the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. – 2021. – Vol. 15 No. 4. – Akademia Morska w Gdyni, – p. 749-753. DOI: 10.12716/1001.15.04.05.

Articles in other foreign publications:

6. Kamieniev K. Automation of constraints creation for master bay plan problem / K. Kamieniev, A. Kamienieva // Slovak international scientific journal. – 2020. – Vol. 2 (45). – p. 19-23.
7. Каменев К.И. Подготовка входных данных для решения основной проблемы бэй-плана. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VIII (29), Issue: 238, 2020. - с. 71 - 73.

Conference proceedings:

8. Kamieniev K. Relative container layout constrictions for automated stowage planning / K. Kamieniev, E. Strakhov // 9th International conference “Science and society”. Hamilton, Canada – 2019. – p. 1048-1052.

