

Оптимізація процесу завантаження контейнеровозу

А. І. Федоров

Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна
Corresponding author E-mail: a_ben@i.ua

Paper received 06.12.20; Accepted for publication 20.12.20.

<https://doi.org/10.31174/SEND-NT2020-244VIII30-11>

Анотація. Наукове дослідження присвячено вивченню особливостей процесу завантаження-вивантаження контейнеровозу під час виконання ним мультипортових рейсів. Метою дослідження є розробка математичної моделі завантаження судна-контейнеровозу, що забезпечує зменшення впливу переміщення контейнерів та зменшує витрати часу на формування вантажного плану судна. Розроблено математичну модель завантаження контейнеровозу, яка дозволяє одночасно враховувати мультипортовість виконання рейсу судна та технологічні обмеження формування вантажного плану обумовлені особливостями їх розміщення на судні.

Ключові слова: вантажний план судна, фідерні перевезення, управління завантаженням контейнеровозу, оптимізація завантаження.

Вступ. Оптимізація вантажного плану контейнеровозу в сучасних умовах зростання обсягів контейнерних перевезень має вкрай важливе значення для світового судноплавства, оскільки при здійсненні вантажних операцій на контейнеровозі вони доволі часто здійснюються за принципом «останній завантажений – перший вивантажений», що призводить до формування неоптимального вантажного плану судна [1].

Побудова технологічно обумовлених ланцюжків завантаження-вивантаження контейнерів, особливо, якщо маршрут судна проходить через кілька портів, призводить до виникнення проблеми так званого шифтінга, тобто нераціональних вантажних операцій завантаження-вивантаження контейнерів на судні з метою вилучення лише потрібних в завданому порту контейнерів. Згідно [2], плата за переміщення контейнерів може бути високою, складаючи близько 200 доларів США за один контейнер. Крім того зазначені операції призводять не лише до зростання часу здійснення вантажних операцій, але й впливають на зміну параметрів остійності судна, тому повинні ретельно контролюватися [6]. Таким чином, головною метою раціонального планування розміщення вантажу на контейнеровозах є мінімізація кількості непотрібних переміщень контейнерів. Важливо також зазначити, що слід враховувати інші параметри, такі як остійність контейнеровозу, вага кожного з контейнерів, та їх тип (стандартний, небезпечний та ін.).

Зменшення кількості шифтінга позитивно впливає на економічні показники перевезення контейнерних вантажів, тому являє собою актуальну наукову та практичну задачу сучасного судноводіння.

Короткий огляд публікацій за темою. В ході аналізу робіт, присвячених створенню моделей і методів розміщення контейнерів на судні і терміналі було визна-

чено, що для вирішення подібних завдань використовуються евристичні підходи, такі як: ітераційний локальний пошук (iterative local search, ils)[10]; спрямований локальний пошук (guided local search, gls) [4]; еволюційний алгоритм (evolutionary algorithm, ea) [5]; пошук зі змінною околицею (variable neighborhood search, vns); імовірнісний жадібний алгоритм (grasp) [3]; імітація відпалу (simulated annealing, sa) [9]; пошук із заборонами (tabu search, ts) [7]; генетичний алгоритм (genetic algorithms, ga) [11]; алгоритм оптимізації мурашиної колонії (ant colony optimization, aco) [8].

Порівняльний аналіз досліджень, проведених різними авторами, показує, що ефективним методом вирішення проблеми є комбінований двохетапний підхід, заснований на формуванні субоптимального плану завантаження контейнеровозу з використанням методу гілок і меж з послідовним застосуванням методу пошуку із заборонами. При цьому також з'являється можливість її додаткового уточнення і ускладнення шляхом введення додаткових обмежень по вазі, розмірам контейнерів, та заздалегідь визначеним місцям розташування окремих груп контейнерів на судні, наприклад рефрижераторних.

Мета. Метою роботи є створення математичної моделі з оптимізації формування вантажного плану контейнеровозу при здійсненні мультипортових перевезень.

Матеріали та методи. Субоптимальне розміщення контейнерів на судні може бути знайдено за прийнятний проміжок часу у випадку застосування комбінованого евристичного методу розробленого в роботі. Для зниження обчислювальної складності процесу формування вантажного плану контейнеровозу пропонується розділити цей процес на два етапи: стратегічне планування вантажного плану та тактичне планування.

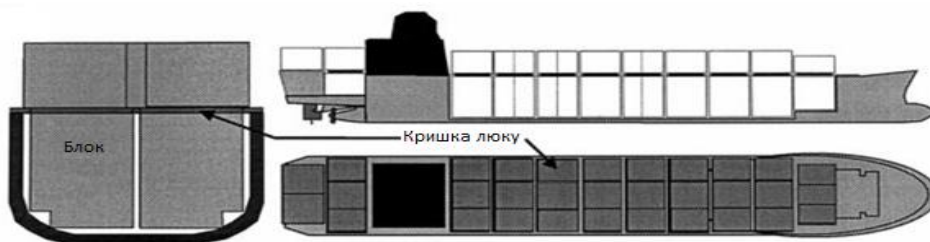


Рис. 1. Розбиття вантажного простору контейнеровозу на окремі блоки

Під час стратегічного планування групи контейнерів розміщуються блоками, в яких місця розміщення кон-

тейнерів, що відповідають кришкам люків, згруповані разом (рис. 1. та рис. 2(a)).

Під час тактичного планування конкретні контейнери розміщуються в конкретні місця всередині блоків, ви-

значених на етапі стратегічного планування (рис. 2(б)).

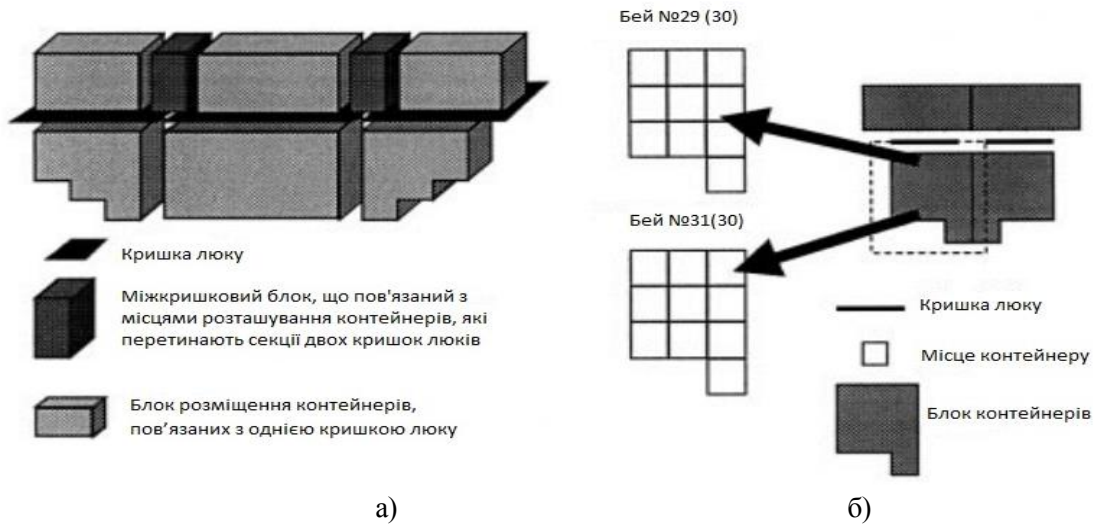


Рис. 2. Взаємозв'язок між блоками, кришками люків та місцями розміщення контейнерів (беями).

Процес стратегічного планування дозволяє сформулювати узагальнений карго-план у кінці процесів розвантаження і завантаження у кожному порту призначення (ПП). Під час тактичного планування точно визначається місце контейнера, яке він буде займати у порту призначення. Це дозволяє уникнути обчислювальних складнощів, пов'язаних з початковим розміщенням усіх контейнерів в загальному контейнерному масиві контейнеровозу. Кожен блок складається з кількох місць розміщення, розташованих в межах однієї кришки люку (групування по ширині) так, як це показано на рис. 2(б). Таким чином формується вантажний план судна.

Для вирішення задачі стратегічного планування приймемо наступні умовні позначення:

cr_i - кількість кранів в ПП i ;

nd - кількість ПП;

nh - кількість люків;

nc - кількість контейнерів;

nb - кількість боків;

nr - кількість боків, що укладені нагорі;

nl - кількість кришок люків;

$DH_{ij} = 1$ якщо контейнер в ПП i знаходиться в люку j , інакше 0;

XC_i - найбільша кількість контейнерів в ПП i розміщених в будь якому люку;

YC_i - найбільша кількість контейнерів розміщених для ПП i мінус XC_i ;

$DHN_{ijk} = 1$ якщо існує контейнер для ПП i в люку j і інший в межах сусіднього люку k ;

$DB_{ij} = 1$ якщо контейнер для ПП i існує в блоці j , інакше 0;

$DBR_{ijkl} = 1$ якщо контейнер для ПП k існує в блоці i і контейнер для ПП l існує в блоці j , де блок i вище блоку j і ПП k знаходиться далі ПП l , інакше 0;

$DL_{ij} = 1$ якщо контейнер для ПП i існує нижче кришки люку j , інакше 0;

VR_{ij} - залишкова ємність блоку i під кришкою, де зберігаються контейнери розташовані в блоці j , який знаходиться над кришкою і блок i знаходиться нижче блоку j ;

Цільова функція процесу стратегічного планування матиме вигляд:

$$f = ((f_1 \times w_1) + (f_2 \times w_2) + \dots + (f_9 \times w_9)) \quad (1)$$

де: f_i і w_i - відповідно значення складових цільової функції та їх ваги, що характеризують рівень придатності конкретного варіанта розміщення контейнерів.

Найменше значення цільової функції відповідає найкращому варіанту розміщення.

Перша складова цільової функції f_1 визначає кількість люків, які зайнято контейнерами для кожного ПП, при цьому кращий варіант розміщення характеризується меншою кількістю люків:

$$f_1 = \sum_{i=1}^{nd} \sum_{j=1}^{nh} DH_{ij} \quad (2)$$

Друга складова цільової функції f_2 визначає скільки люків зайнято контейнерами у кожному ПП, і потім порівнює цю кількість з кількістю кранів що є в наявності в цьому ПП. Це потрібно для визначення необхідної кількості кранів у ПП, що залежить від кількості люків, зайнятих в цьому ПП:

$$f_2 = \sum_{i=1}^{nd} \left(\sum_{j=1}^{nh} DH_{ij} \right) \cdot cr_i \quad (3)$$

Третя складова цільової функції, f_3 визначає наскільки добре контейнери розподілені між люками, і, таким чином, наскільки ефективною буде робота кранів. В ідеальному випадку контейнери повинні бути розміщені таким чином, щоб працювали всі крани, задіяні в розвантаженні:

$$f_3 = \sum_{i=1}^{nd} |XC_i - YC_i| \quad (4)$$

Четверта складова цільової функції, f_4 , рахує кількість ПП, існуючих для кожного люку. Кращий варіант розміщення контейнерів характеризується мінімальною кількістю ПП для кожного люку:

$$f_4 = \sum_{i=1}^{nh} \sum_{j=1}^{nd} DH_{ji} \quad (5)$$

П'ята складова цільової функції, f_5 , є штрафною функцією, що визначає фрагменти розміщення контейнерів, в яких контейнери для одного ПП розміщені в сусідніх люках, що не дозволяє розвантажувати їх одночасно двома кранами:

$$f_5 = \sum_{i=1}^{nd} \sum_{j=1}^{nh} \sum_{k=1}^{nh} DHH_{ijk} \quad (6)$$

Шоста складова цільової функції, f_6 , рахує кількість зайнятих контейнерами блоків для кожного ПП. Мінімальне змішування контейнерів для різних ПП в блоках відповідає кращому карго-плану:

$$f_6 = \sum_{i=1}^{nd} \sum_{j=1}^{nb} DB_{ij} \quad (7)$$

Сьома складова цільової функції, f_7 , є штрафною функцією яка рахує кількість контейнерів, що розміщені на кришках люків, під якими є контейнери, призначені для попереднього ПП:

$$f_7 = \sum_{i=1}^{nb} \sum_{j=1}^{nb} \sum_{k=1}^{nd} \sum_{l=1}^{nd} DBR_{ijkl} \quad (8)$$

Восьма складова цільової функції, f_8 , визначає, наскільки добре контейнери розміщені під кришками люків, від чого залежить ефективність роботи портових кранів:

$$f_8 = \sum_{i=1}^{nd} \sum_{j=1}^{nl} DL_{ij} \quad (9)$$

Дев'ята складова цільової функції, f_9 , рахує кількість місць під кришкою люків, над якими знаходяться контейнери. Чим більше таких місць, тим гіршим є карго-план:

$$f_9 = \sum_{i=1}^{nr} \sum_{j=1}^{nb} VR_{ij} \quad (10)$$

Після визначення складових цільової функції здійснюється її мінімізація із застосуванням методу гілок та меж, що включає в себе п'ять етапів.

1. Визначення початкового розташування контейнерів. Контейнери розміщуються блоками відповідно до вантажного простору судна і етапів стратегічного планування. При цьому розміщення розпочинається з контейнерів, призначених для найдалшого ПП.

2. Визначення гілок. Генеруються нові рішення, що відображають кожне можливе розміщення першого контейнеру із списку завантаження у вантажному просторі судна. Невірні варіанти розміщень видаляються.

3. Пошук. Варіанти рішень, сформовані під час

визначення гілок аналізуються на придатність за допомогою цільової функції. Найбільш придатні варіанти розміщення запам'ятовуються.

4. Обрізка. Відбувається зменшення кількості варіантів рішень за рахунок вилучення тих розміщень, що при однаковому значенні цільової функції передбачають більшу кількість вантажних операцій.

5. Визначення нових розміщень. Обирається знайдене розміщення з найкращим значенням функції придатності і процес повторюється для наступних контейнерів і ПП.

Далі виконується тактичне планування розміщення контейнерів. Основними завданнями етапу тактичного планування є зменшення переміщень (шифтингу) контейнерів, забезпечення розташування контейнерів відповідно до їх ваги (знизу – важчі, зверху – легші), мінімізація кількості штабелів контейнерів з різними ПП.

Для визначення цільової функції тактичного планування застосуємо наступні позначення:

$C : \{c_1, \dots, c_{nc}\}$ - множина усіх контейнерів;

nc - кількість контейнерів;

D_i - порт призначення контейнеру i ;

DR_i - множина переміщень, які пов'язані з контейнером i ;

DW_i - множина контейнерів в одному штабелі, що розміщені вище контейнеру i і мають більшу вагу;

DS_i - множина контейнерів що мають різні ПП і знаходяться в одному штабелі з контейнером i .

Цільова функція процесу тактичного планування має вигляд:

$$f = (f_{10} \times w_{10}) + (f_{11} \times w_{11}) + (f_{12} \times w_{12}) \quad (11)$$

де w_i - вага відповідної складової f_i цільової функції.

Перша складова цільової функції, f_{10} , визначає кількість шифтингу:

$$f_{10} = \sum_{i=1}^{nc} \sum_{j=1}^{nc} \begin{pmatrix} 1 & \text{якщо} & i \in DR_j \\ 0 & \text{якщо} & i \notin DR_j \end{pmatrix} \quad (12)$$

Друга складова цільової функції, f_{11} , визначає кількість контейнерів з різними ПП, що розміщені в одному штабелі:

$$f_{11} = \sum_{i=1}^{nc} \sum_{j=1}^{nc} \begin{pmatrix} 1 & \text{якщо} & i \in DS_j \\ 0 & \text{якщо} & i \notin DS_j \end{pmatrix} \quad (13)$$

Третя складова цільової функції, f_{12} , визначає кількість контейнерів більшої ваги, що розміщені в одному штабелі один поверх одного:

$$f_{12} = \sum_{i=1}^{nc} \sum_{j=1}^{nc} \begin{pmatrix} 1 & \text{якщо} & i \in DW_j \\ 0 & \text{якщо} & i \notin DW_j \end{pmatrix} \quad (14)$$

Тактична оптимізація вантажного плану контейнеро-возу здійснюється із застосуванням методу пошуку із заборонами. Відбувається ітераційний процес пошуку рішення з найбільш придатних розміщень контейнерів на судні. При цьому для варіанта розміщення контейнерів S в усьому контейнерному просторі судна, множи-

на $M(s)$ представляє собою множину припустимих переміщень m , які можуть бути застосовані до розміщення S з метою отримання нового розміщення $s' = s \otimes m$,

що дає $N(s) = \{s' \mid \exists m \in M(s) \text{ де } s' = s \otimes m\}$. Такі

переміщення здійснюються з метою знаходження субоптимального розміщення контейнерів, виходячи з мінімізації цільової функції f .

Результати та їх обговорення. Розроблена математична модель завантаження контейнеровозу була застосована при створенні автоматизованої системи управління вантажними операціями контейнеровозу (АСУВОК), яка взаємодіє з причальними контейнерними кранами та судновою інформаційною системою.

При заході контейнеровозу в порт здійснюється підключення АСУВОК по мережі WiFi до мережі Інтернет, до якої також підключені комп'ютери причальних контейнерних кранів. Після реєстрації в мережі сформований АСУВОК план завантаження судна відображається на комп'ютері перевантажувача. Піднятий контейнер розміщується портовим краном в задану позицію, і інформація про його розміщення надходить в суднову інформаційну систему.

Практичне застосування розробленої математичної моделі в АСУВОК дозволило зменшити кількість шиф-

тінгу контейнерів та витрати часу на формування вантажного плану судна на 25-30%.

Відмінною рисою запропонованого підходу до формування вантажного плану контейнеровозу є його орієнтованість до застосування на фідерних перевезеннях (особливістю фідерних перевезень є мультипортовість та невелика кількість контейнерів на судні: 600-1200), в яких тривалість і вартість вантажних операцій в портах мають значний вплив на економічні показники виконання рейсу.

Висновки. В результаті проведеного аналізу наукових досліджень у галузі морських контейнерних перевезень було з'ясовано, що питання створення АСУВОК є актуальною науковою проблемою сьогодення, яка потребує вирішення з урахуванням нагальних поточних потреб морської індустрії.

Розроблена математична модель для оптимізації процесу завантаження контейнеровозу з урахуванням процесу його заходження до кількох портів дозволила скоротити час виконання вантажних операцій шляхом зменшення кількості шифтінгу контейнерів та тривалості вантажних операцій в портах, що поліпшує економічні показники виконання рейсу.

Перспективним напрямом подальших досліджень є введення до створеної математичної моделі додаткових обмежень, що враховують особливості розміщення контейнерів на судні в залежності від їх типу та конструктивних особливостей конкретного судна.

ЛІТЕРАТУРА

1. Снопков В.И. Технология перевозки грузов морем: Учебник для вузов. – 4-е издание, переработанное и дополненное / В.И. Снопков. – СПб: НПО «Профессионал», 2006. – 500 с.
2. Ambrosino, D., Anghinolfi, D., Paolucci, M. and Sciomachen, A. (2010) 'An experimental comparison of different heuristics for the master bay plan problem', Lecture Notes in Computer Science. – Vol. 6049. – Pp.314–325.
3. Avriel, M., Penn, M. and Shpirer, N. (2000) 'Containership stowage problem: complexity and connection to the coloring of circle graphs', Discrete Applied Mathematics. – Vol. 103, Nos. 1–3. – Pp.271–279.
4. Blum, C. and Roli, A. (2003) 'Metaheuristics in combinatorial optimization overview and conceptual comparison', ACM Computing Surveys. – Vol. 35, No. 3. – Pp.268–308.
5. Dubrovsky, O., Levitin, G. and Penn, M. (2002) 'A genetic algorithm with a compact solution encoding for the containership stowage problem', Journal of Heuristics. – Vol. 8, No. 6. – Pp.585–599.
6. Fan, L., Low, M.Y.H., Ying, H.S., Jing, H.W., Min, Z. and Aye, W.C. (2010) 'Stowage planning of large containership with tradeoff between crane workload balance and ship stability', Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computers Scientists. – Vol. III. – Pp.1–7.
7. Imai, A., Sasaki, K., Nishimura, E. and Papadimitriou, S. (2006) 'Multi-objective simultaneous stowage and loading planning for a container ship with container rehandle in yard stacks', European Journal of Operational Research. – Vol. 171, No. 3. – Pp.373–389.
8. Sciomachen, A. and Tanfani, E. (2007) 'A 3D-BPP approach for optimizing stowage plans and terminal productivity', European Journal of Operational Research. – Vol. 183, No. 3. – Pp.1433–1446.
9. Vacca, I., Bierlaire, M. and Salani, M. (2007) 'Optimization at container terminals: status, trends and perspectives', 7th Swiss Transportation Research Conference, September. – Pp.1–21.
10. Valente, J.M.S. and Alves, R.A.F.S. (2005) 'Filtered and recovering beam search algorithm for the early/tardy scheduling problem with no idle time', Computers & Industrial Engineering. – Vol. 48, No. 2. – Pp.363–375.
11. Wilson, I. and Roach, P.A. (1999) 'Principles of combinatorial optimization applied to container-ship stowage planning', Journal of Heuristics. – Vol. 5, No. 4. – Pp.403–418.

REFERENCES

1. Snopkov V.I. Tekhnologiya perevozki Грузов морем: Uchebnik dlya vuzov. SPb: NPO «Professional», 2006. 500 s.

Optimization of the container ship loading process

A. Fedorov

Abstract. The scientific research is devoted to the study of the peculiarities of the process of loading and unloading of a container ship during the performance of multiport transportation. The aim of the study is to develop a mathematical model of loading a container ship, which reduces the impact of container movement and reduces the time spent on the formation of the cargo plan of the vessel. A mathematical model of container ship loading has been developed, which allows to take into account the multiport ship transport and technological limitations of the cargo plan formation due to the peculiarities of their placement on the ship.

Keywords: cargo plan of the vessel, feeder transportation, container ship loading control, loading optimization.