

## АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МЕТОДІВ ФОРМУВАННЯ ВАНТАЖНИХ ПЛАНІВ КОНТЕЙНЕРОВОЗІВ ТА ШЛЯХИ ЇХ ПОДАЛЬШОГО ВДОСКОНАЛЕННЯ

**Бень А. П.**, к.т.н., професор, проректор з науково-педагогічної роботи Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: a\_ben@i.ua, ORCID: 0000-0002-9029-3489;

**Соколов А. В.**, аспірант, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: arthursokolov7@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3115-3854.

*У статті досліджуються питання оптимізації вантажних планів контейнеровозів в умовах здійснення мультипортових контейнерних перевезень. Проведено порівняльний аналіз існуючих методів формування та оптимізації вантажних планів контейнеровозів та визначено переваги та недоліки практичного застосування кожного методу. Підкреслено потенційні проблеми, які виникають під час практичного застосування розглянутих аналітичних та евристичних методів. Визначено низку обов'язкових умов, які повинні бути виконані при складанні вантажного плану контейнеровозів та шляхи їх застосування в якості обмежень при вирішенні багатокритеріальної оптимізаційної задачі. Проаналізовано особливості процесу побудови вантажних планів контейнеровозів при здійсненні мультипортових контейнерних перевезень та обґрунтовано вибір кращого методу розв'язання задачі оптимізації структури вантажного плану судна в зазначених умовах. Показано перспективність застосування багатоетапних адаптивних методів оптимізації вантажних планів контейнеровозів. Розроблено адаптивний багатоетапний метод формування оптимального вантажного плану судна та визначено функції системи підтримки прийняття рішень судноводія для його практичної реалізації. Запропоновано критерії оцінки якості оптимізації вантажного плану судна. Розглянуто перспективні шляхи подальшого розвитку та вдосконалення методів формування планів контейнеровозів у сучасних умовах.*

***Ключові слова:** вантажний план контейнеровозу; методи багатокритеріальної оптимізації; мультипортові перевезення; системи підтримки прийняття рішень; управління судном; безпека судноплавства.*

**DOI: 10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.006-016**

**Вступ.** Зростання обсягів світових морських контейнерних перевезень та розмірів сучасних контейнеровозів обумовлює постійне підвищення вимог до їх безпечності та економічної ефективності. Найважливішою компонентою ефективних та безпечних контейнерних перевезень є складання раціонального вантажного плану контейнеровозу, який повинен одночасно відповідати багатьом, іноді взаємно суперечливим вимогам: забезпеченню максимально можливої контейнероємності судна, мультипортовості перевезень, скорочення часу виконання вантажних операцій в портах, дотримання вимог до сегрегації та розміщення небезпечних вантажів та вантажів з особливими умовами перевезення, збереження остійності судна тощо. Окремим питанням формування вантажного плану є також необхідність врахування мультипортовості контейнерних перевезень, оскільки наявність проміжних портів істотно впливає як на структуру вантажного плану судна, так і на вибір кращих методів розв'язання поставленої задачі.

**Постановка проблеми.** Вантажний план контейнеровозу визначає порядок розташування окремих контейнерів на судні у відповідності з технологічними вимогами до розміщення контейнерів та правилами перевезення вантажів. Слід зазначити, що нераціональне розміщення контейнерів призводить до необхідності здійснення зайвих вантажних операцій у порту – тимчасового переміщення одних контейнерів з метою вивільнення інших. Вказане явище має назву «шифтінг» і призводить до зниження економічної ефективності рейсу, оскільки потребує збільшення кількості вантажних операцій і тривалості перебування судна в порту, що обумовлює появу додаткових витрат (вартість переміщення одного невірної розташованого контейнера може сягати від кількох десятків до кількох сотень доларів). Окрім економічної ефективності виконання рейсу, шифтінг також має істотний вплив на його безпекову складову, оскільки саме від шифтінгу

залежить кількість вантажних операцій з контейнерами. Тому зменшення кількості шифтінгу є вельми актуальною науково-практичною задачею.

Особливо гостро проблема шифтінгу постає у випадках, коли під час здійснення рейсу судно заходить до кількох портів, в яких здійснюються операції завантаження/вивантаження контейнерів, оскільки в такому разі необхідно створювати оптимальний або субоптимальний вантажний план судна, який буде коригуватися протягом рейсу. Побудова такого вантажного плану потребує розробки нових та вдосконалення існуючих методів розв'язання багатокритеріальних оптимізаційних задач, а також створення відповідних систем для їх практичної реалізації, що і є предметом даного дослідження.

#### **Аналіз останніх досліджень та публікацій.**

Проблематиці складання оптимальних вантажних планів контейнеровозів присвячена значна кількість наукових публікацій як зарубіжних, так і вітчизняних авторів, зокрема [1–17]. Визначено, що формування такого плану являє собою складну багатокритеріальну NP-повну оптимізаційну задачу, яка повинна вирішуватися за наявності низки певних функціональних та часових обмежень. На поточний момент часу зазначена проблема вирішена лише частково і постійно знаходиться у фокусі уваги науковців з різних країн. Слід зазначити, що значна кількість взаємовиключних обмежень, яких необхідно дотримуватись при складанні вантажного плану, призводить до суттєвого ускладнення зазначеної оптимізаційної задачі і вимушує дослідників створювати принципово різні методи її розв'язання, кожен з яких має як свої переваги, так і недоліки. Так, авторами в роботах [1, 3, 9, 10] запропоновано застосування точних методів оптимізації (лінійне або динамічне програмування, метод меж і гілок, пошук із заборонами, розташування за логічними тощо), у роботах [2, 4, 5, 7, 8] пропонується застосування евристичних, або ймовірнісних методів (імітація відпалу, жадібні, генетичні, мурашині або ройові алгоритми, метод променевого пошуку), а в роботах [6, 13, 16] розглянуто комбіноване застосування методів з двох вищевказаних груп. У свою чергу, слід зазначити, що оптимізація вантажного плану контейнеровозу у випадку здійснення мультипортових перевезень має ряд специфічних рис, які потребують розробки нових та вдосконалення наявних методів оптимізації вантажного плану судна.

Вирішенню цього питання та визначенню пріоритетних шляхів розвитку математичних моделей, методів та програмних засобів керування вантажними операціями контейнеровозів в умовах здійснення мультипортових рейсів і присвячена стаття.

**Мета та задачі дослідження.** Метою дослідження є проведення порівняльного аналізу існуючих методів формування вантажних планів контейнеровозів та визначення шляхів їх подальшого вдосконалення для випадку застосування в задачах оптимізації вантажних операцій мультипортових контейнерних перевезень.

**Виклад основного матеріалу.** З математичної точки зору задача формування оптимального вантажного плану контейнеровозу являє собою багатокритеріальну оптимізаційну задачу тривимірного пакування з обмеженнями. Як зазначено в роботах [1, 2], за обчислювальною складністю ця задача є NP-повною, тому її розв'язання методом повного перебору всіх можливих варіантів розташувань контейнерів неможливе і потрібне застосування складних імітаційних або евристичних методів розв'язку. Слід зазначити, що застосування конкретного методу формування вантажного плану контейнеровозу суттєво залежить від специфіки класу задач, що вирішуються (технічні характеристики судна, кількість і тип контейнерів, що розміщуються, вид вантажів, кількість портів під час виконання рейсу, вантажне устаткування на судні та в портах, час розв'язання задачі, тощо).

Визначено, що при складанні вантажного плану контейнеровозу необхідно враховувати низку обов'язкових та додаткових обмежень, які можна структурувати наступним чином.

1. Дотримання вимог збереження міцності корпусу судна та врахування його конструктивних особливостей (поздовжня міцність корпусу, вигинаючі моменти, міцність палуби, розташування кришок люків та місць кріплення контейнерів тощо).

2. Дотримання вимог до збереження остійності судна (контроль припустимих меж для метацентричної висоти, осадки, крену та диференту).

3. Врахування послідовності завантаження-вивантаження контейнерів у відповідності з портами під час виконання рейсу (мінімізація «шифтіngu»).

4. Дотримання технологічних вимог до взаємного розташування і кріплення 20-ти та 40-ка футових контейнерів, а також контейнерів збільшеної висоти та довжини.

5. Врахування вимог, пов'язаних з сегрегацією вантажів та розміщенням небезпечних вантажів на судні.

6. Розміщення рефрижераторних та спеціалізованих контейнерів у заздалегідь призначених для них місцях.

Додатково при формуванні вантажного плану судна бажано враховувати характеристики вантажного обладнання та порядок здійснення вантажних робіт у портах призначення.

Розв'язання проблеми формування оптимального вантажного плану контейнеровозу досліджувалось багатьма вітчизняними і зарубіжними вченими. Існує значна кількість теоретичних і практичних розробок, присвячених розв'язанню і розвитку шляхів вирішення зазначеної проблеми.

Так, у роботі [1] визначено, що проблема планування завантаження контейнеровоза може бути зведена до лінійної двійкової моделі, а оптимальне рішення можна знайти виходячи із заздалегідь відомої кількості контейнерів, що завантажуються/вивантажуються в кожному з портів призначення. Зазначений підхід є суттєво спрощеним, оскільки виходить з припущення, що всі контейнери мають однаковий розмір та вагу, крім того, він має певні обмеження щодо кількості контейнерів, які підлягають розміщенню. Таким чином, його вивчення має переважно теоретичне значення, а реальне практичне застосування є вкрай обмеженим.

Авторами роботи [2] для вирішення задачі оптимального завантаження судна запропоновано застосування генетичного алгоритму, при цьому в якості функції відбору кращих рішень застосовуються обмеження стосовно дотримання умов збереження остійності судна. Запропонований підхід було застосовано для випадку контейнеровозу в 1000 TEU і кількох портів завантаження-вивантаження. Практичне застосування запропонованого підходу доцільне

У роботі [3] авторами застосовується двох етапний метод формування вантажного плану. На першому етапі застосовується метод гілок та меж для розміщення контейнерів по вантажним відсікам. На другому етапі за допомогою методу пошуку із заборонами відбувається розміщення контейнерів по комірках. Метод придатний для застосування на контейнеровозах невеликої контейнеромісткості, що перевозять переважно контейнери одного типу. Розміщення рефрижераторних, спеціалізованих контейнерів та контейнерів нестандартного розміру потребує внесення суттєвих модифікацій у запропоновані математичні моделі оптимізації.

Автори роботи [4] застосували для формування оптимального вантажного плану контейнеровозу алгоритм мурашиної колонії. Основними обмеженнями виступають вимоги до збереження остійності і міцності корпусу судна. В якості основних недоліків запропонованого підходу слід зазначити тривалий час розв'язання задачі, а також потенційну можливість втрати частки рішень, включаючи оптимальне.

У роботі [5] розглянуто використання методів імітації відпаду та генетичних алгоритмів. Зазначається, що вказані методи можуть бути застосовані для побудови вантажного плану судна у випадках виконання рейсу між кількома портами. Разом з тим, запропонована в роботі модель формування вантажного плану вельми ідеалізована і обмежена, оскільки базується на припущеннях, що всі контейнери мають однаковий тип і розмір (40 TEU), вага контейнерів також не враховується. Вказані обставини не дозволяють застосовувати її у явному вигляді для вирішення реальних практичних задач, хоча вона і

придатна для проведення порівняльного аналізу обох методів.

Автори роботи [6] пропонують використовувати для розв'язання задачі жадібні оптимізаційні алгоритми у поєднанні з логічними правилами. Зазначається, що істотним недоліком жадібного алгоритму є його чутливість до структури вантажного плану судна. Його застосування малоефективне для вантажних планів, що передбачають потенційну наявність значної кількості шифтінгу контейнерів, тобто, для мультипортових перевезень.

Застосування для формування вантажного плану контейнеровозу ройового евристичного алгоритму розглянуто у статті [7]. Сутність алгоритму полягає в пошуку оптимальних рішень шляхом імітаційного моделювання їх розташування за правилами ройового алгоритму з урахуванням п'яти основних характеристик для кожного контейнера: розмір, тип, вага, центр тяжіння та позиція розташування контейнеру. Недоліками пропонованого підходу є його схильність до знаходження локальних оптимумів, і, таким чином, втрати частки рішень, а також складність застосування для випадку мультипортових перевезень.

Одним з можливих шляхів оптимізації вантажного плану є застосування алгоритму променевого пошуку, як це запропоновано авторами в роботі [8]. Перевагою зазначеного методу є порівняно низька обчислювальна складність і відповідно, висока, у порівнянні з іншими методами, швидкість отримання рішень. Втім, він має істотні недоліки, головними з яких є обмежена область пошуку і висока ресурсомісткість. Застосування методу не гарантує знаходження оптимального рішення, також існує велика ймовірність втрати частки рішень. З огляду на вищезазначене, практичне застосування алгоритму променевого пошуку можливе лише у поєднанні з іншими методами оптимізації, тому авторами статті додатково було застосовано метод пошуку із заборонами.

Авторами роботи [9] проаналізовано особливості складання вантажного плану судна при наявності небезпечних вантажів, з урахуванням вимог IMDG Code (International maritime dangerous goods code, Міжнародний кодекс морського перевезення небезпечних вантажів). Пропонується застосування адитивного алгоритму розміщення, що базується на принципах цілочисельного лінійного програмування. Місця розташування контейнерів з небезпечними вантажами. Проте, внаслідок високої обчислювальної складності, пропонований підхід може бути застосований лише для вантажних планів невеликої розмірності.

Грунтовний аналіз особливостей застосування класичних методів цілочисельного лінійного програмування для розв'язання задачі оптимізації вантажного плану контейнеровозу наведено у роботі [10], автори якої зазначають, що їх практичне застосування доцільно здійснювати у комбінації з евристичними методами пошуку рішень.

Питання дотримання вимог остійності та міцності корпусу судна при складанні вантажного плану контейнеровозу докладно розглянуті в роботах [11, 12]. Зазначається, що незалежно від обраного методу оптимізації, вищезазначені вимоги виступають в якості обмежень області пошуку рішень, що дозволяє істотно зменшити кількість варіантів розташувань контейнерів, що аналізуються, та скоротити час, потрібний на знаходження розв'язку задачі.

Додатковими обмеженнями, що доцільно застосовувати при формуванні вантажного плану є особливості портової інфраструктури. Так, авторами роботи [13], зокрема вказано, що з метою скорочення витрат часу на проведення вантажних операцій у портах при складанні вантажного плану судна необхідно додатково враховувати технічні можливості вантажного обладнання порту (кількість та розташування вантажних кранів) і порядок здійснення вантажних операцій у ньому.

Таким чином, проведений порівняльний аналіз робіт зарубіжних та вітчизняних авторів дозволив визначити переваги та недоліки кожного із вищезазначених методів, а також обмеження, що до умов їх практичного застосування, які наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Характеристики існуючих методів формування вантажних планів контейнеровозів

№	Метод формування вантажного плану/математичні моделі, що застосовуються	Спосіб пошуку рішення	Обчислювальна складність/час пошуку рішення	Тип рішення, що буде отримано	Обмеження/особливості застосування
1	2	3	4	5	6
1	Повного перебору	Аналітичний, розрахунковий	Дуже висока/ Дуже довгий	Оптимальне рішення за умов можливості виконання усіх обмежень	З огляду на вкрай високу обчислювальну складність, на практиці не застосовується. В окремих випадках може бути застосований для перевірки рішень, отриманих іншими методами.
2	Лінійне програмування	Аналітичний, розрахунковий	Висока/ Довгий	Оптимальне рішення за умов можливості виконання усіх обмежень	Має високу обчислювальну складність. Може бути застосований для розв'язання задач малої розмірності. Практичне застосування для формування вантажного плану можливе у комбінації з евристичними методами
3	Розташування за правилами	Аналітичний, формально-логічний	Висока/ Довгий	Оптимальне рішення за умов можливості виконання усіх обмежень	Має високу обчислювальну складність. Практичне застосування потребує введення низки додаткових обмежень або комбінації з евристичними методами.
4	Імітація відпалу	Ймовірнісний, імітаційне моделювання	Висока/ Довгий	Множина субоптимальних рішень	Має високу обчислювальну складність. Необхідно враховувати схильність методу до знаходження множини локальних оптимумів. Потребує додаткового аналізу/перегляду отриманих рішень.
5	Генетичні алгоритми	Ймовірнісний, імітаційне моделювання	Середня/ Середній	Множина субоптимальних рішень (можливе знаходження оптимального)	Потребує застосування складних обчислювальних процедур імітаційного моделювання. Бажано проведення додаткового порівняння отриманих варіантів рішень з метою вибору найкращого.
6	Метод меж і гілок	Аналітичний, динамічне програмування	Низька/ Короткий	Негарантоване оптимальне або субоптимальне рішення	Чутливість ефективності пошуку рішення до обсягу і структури вантажного плану судна. Можлива втрата частки рішень.
7	Пошук із заборонами (табу пошук)	Аналітичний, динамічне програмування	Низька/ Короткий	Негарантоване оптимальне або субоптимальне рішення	Чутливість ефективності пошуку рішення до обсягу і структури вантажного плану судна. Можлива втрата частки рішень.

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6
8	Метод мурашиної колонії	Евристично-ймовірнісний	Середня/ Середній	Негарантоване оптимальне або субоптимальне рішення	Потребує застосування ітераційних обчислювальних процедур імітаційного моделювання. Необхідно проведення додаткового порівняння отриманих варіантів рішень з метою вибору найкращого.
9	Жадібний алгоритм	Евристичний	Низька/ Короткий	Негарантоване оптимальне або субоптимальне рішення	Чутливість ефективності пошуку рішення до обсягу і структури вантажного плану судна. Малопридатний для вантажних планів із значною кількістю портів. Можлива втрата частки рішень. В окремих випадках рішення може бути не знайдено.
10	Ройовий алгоритм	Евристичний	Низька/ Короткий	Негарантоване оптимальне або субоптимальне рішення	Малопридатний для вантажних планів із значною кількістю портів. Можлива втрата частки рішень. В окремих випадках рішення може бути не знайдено.
11	Метод променів	Евристичний	Низька/ Короткий	Негарантоване оптимальне або субоптимальне рішення	Обмежена область пошуку рішень, висока ресурсомісткість, можлива втрата частки рішень. В окремих випадках рішення може бути не знайдено.

Виходячи з інформації, що наведена у таблиці, можна зробити висновок, що методи, які застосовуються для вирішення поставленої задачі, можуть бути розділені на дві великі групи – точні (аналітичні) та евристичні (ймовірнісні). Перевагою точних методів (лінійне або динамічне програмування, повний перебір, тощо) є повна детермінованість і можливість гарантованого знаходження найбільш оптимального рішення. Проте, їх головним недоліком є висока обчислювальна складність, що унеможливорює застосування таких методів без певних обмежень для знаходження рішення в потрібний проміжок часу. Евристичні методи (генетичні алгоритми, імітація відпалу, метод мурашиної колонії, пошук із заборонами, ройовий алгоритм, жадібний алгоритм, променевий алгоритм) навпаки, дозволяють знаходити необхідне рішення відносно швидко, але воно буде лише субоптимальним (проте прийнятним з практичної точки зору для вирішення поставленої задачі). Недоліком евристичних методів також є більш трудомістка, у порівнянні с класичними оптимізаційними процедурами, програмна реалізація та необхідність додаткової перевірки отриманих варіантів рішень з метою вибору найкращих.

Приймаючи до уваги обчислювальну складність формування вантажного плану, можна зробити висновок, що на початковому етапі (побудова основи, або так званого «каркасу» вантажного плану) перевагу слід надати точним та детермінованим методам пошуку рішень, а на завершальному, при остаточному визначенні позиції кожного контейнера на судні, краще застосовувати евристичні. Таким чином, вантажний план судна формуватиметься шляхом комбінованого застосування аналітичних та евристичних методів. У такому випадку початкова схема розміщення контейнерів на судні, тобто планування розміщення контейнерів на судні по беям з урахуванням конструкційних характеристик судна та технологічних умов виконання рейсу, або задача, більш відома як Master Bay

Planning Problem (MBVP) [2], буде вирішуватися за допомогою аналітичних оптимізаційних методів, оскільки її обчислювальна складність порівняно невисока. Задача остаточного розміщення контейнерів по комірках, відома як Slot Planning Problem (SPP) буде вирішуватися шляхом застосування евристичних методів.

У роботах [14–17] розглянуті питання оптимізації вантажних планів контейнеровозів для випадків мультипортових перевезень. Зокрема визначено, що такі перевезення потребують застосування більш складних оптимізаційних процедур формування вантажного плану судна, оскільки додатково виникає потреба в його послідовному коригуванні у відповідності з портами слідування судна.

Таким чином, складність побудови вантажного плану контейнеровозу у випадку здійснення мультипортових перевезень полягає в додатковій необхідності здійснення послідовних ітераційних процедур перегляду і оптимізації вантажного плану судна в процесі виконання всього рейсу.

Виходячи з вищенаведеного, пропонується застосування адаптивного багатоетапного методу формування вантажного плану, застосування якого у такому випадку найбільш доцільне. Сутність розробленого методу полягає у послідовному виконанні наступних етапів.

1. Визначення початкової інформації стосовно технічних характеристик судна, умов виконання рейсу, послідовності портів призначення, кількості, ваги, та типу вантажів, що перевозяться.

2. Розрахунок на основі отриманої інформації множини обов'язкових обмежень вантажного плану (дотримання вимог до збереження міцності корпусу, остійності, диференту і крену судна, розміщення рефрижераторів, контейнерів нестандартних розмірів та контейнерів з небезпечними вантажами, розміщення контейнерів по беям у відповідності до послідовності портів призначення, не перекриття кришок люків, вимог граничних навантажень на палубу судна).

3. Формування каркасу вантажного плану із застосуванням логічних правил розміщення контейнерів, що забезпечують дотримання всіх обмежень, визначених на попередньому кроці.

4. Оптимізація каркасу вантажного плану із застосуванням методів лінійного програмування, визначення масивів контейнерів, які можуть бути перегруповані.

5. Заповнення каркасу із застосуванням евристичних методів: розміщення окремих контейнерів за комірками відповідно до умов взаємного розташування 20-ти та 40-ка футових контейнерів, рефрижераторів, контейнерів нестандартних розмірів та контейнерів з небезпечними вантажами, розташування однотипних контейнерів за вагою відповідно до дотримання вимог остійності.

6. Уточнення заповненого каркасу із застосуванням евристичних методів відповідно із порядком здійснення запланованих вантажних операцій у наступних портах виконання рейсу.

7. Ітеративний адаптивний перегляд та внесення змін до вантажного плану в кожному наступному порту призначення – виконання кроків 3, 4, 5, 6 або лише 5, 6 у залежності від кількості та типу контейнерів, що підлягають завантаженню/розвантаженню в поточному порту.

Особливостями запропонованого методу вирішення поставленої задачі у порівнянні з вже існуючими є врахування потреб мультипортових контейнерних перевезень до адаптивного перегляду вантажного плану в проміжних портах рейсу відповідно до вантажних операцій, які будуть в них виконуватись.

Практичне застосування наведеного методу оптимізації буде здійснено в межах запровадження спеціалізованої системи підтримки прийняття рішень (СППР) керування процесом створення вантажного плану контейнеровозу. Функціонально СППР забезпечує виконання наступних задач:

- формування та графічна візуалізація каркасу вантажного плану судна з урахуванням конструктивних особливостей та конфігурації його вантажних приміщень;
- заповнення каркасу вантажного плану контейнерами, що перевозяться із застосуванням евристичних методів та надання кількох можливих варіантів розміщень судноводію з метою вибору ним найкращого;
- адаптивний перегляд обраного варіанту вантажного плану в кожному порту призначення при внесенні необхідних коригувань.
- розрахунок параметрів остійності та дотримання вимог збереження міцності корпусу судна для заданого вантажного плану.

Якість вантажного плану, що сформований, оцінюється за критеріями мінімізації часу виконання вантажних операцій, зменшення кількості шифтінгу контейнерів, забезпечення технологічності та дотримання вимог безпеки виконання вантажних робіт, дотримання регламентованих умов розміщення та перевезення вантажів.

**Висновки.** На поточний момент часу стрімкий розвиток інформаційних технологій сприяє ускладненню логістичних ланцюжків поставок товарів, що сприяє збільшенню частки мультипортових перевезень контейнерів у сучасному судноплаванні. Мультипортові перевезення, у свою чергу, обумовлюють ряд додаткових специфічних вимог до складання вантажного плану судна, які обов'язково необхідно враховувати для забезпечення безпеки виконання рейсу та підвищення його економічної ефективності. Підвищення економічної ефективності виконання рейсу може бути досягнуто, перш за все, за рахунок скорочення витрат, пов'язаних із знаходженням судна в портах, зменшенням часу виконання та вартістю вантажних операцій, тощо. У випадку контейнерних перевезень це може бути здійснено шляхом зменшення кількості шифтінгу контейнерів на судні під час виконання вантажних операцій. Зменшення операцій шифтінгу контейнерів у портах потребує створення нових та вдосконалення існуючих методів розв'язання багатокритеріальної оптимізаційної задачі складання раціонального вантажного плану судна.

Приймаючи до уваги результати проведеного порівняльного аналізу існуючих підходів і методів її вирішення, можна зробити висновок, що у випадку мультипортових перевезень доцільно здійснювати формування вантажного плану в кілька етапів. Під час виконання початкового етапу формується узагальнений («огрублений») вантажний план, який враховує всі початкові і найважливіші обмеження по розміщенню контейнерів на судні. Таким чином формується так званий головний «каркас» вантажного плану судна. На наступному етапі здійснюється заповнення створеного «каркасу» контейнерами і його уточнення до конкретної позиції кожного окремого контейнера. У разі здійснення мультипортових контейнерних перевезень останній етап ітеративно повторюється в кожному з портів заходу судна з метою внесення додаткових змін до вантажного плану, які можуть виникнути під час виконання рейсу. В окремих випадках зміни можуть бути також внесені в каркас вантажного плану.

Практична реалізація запропонованого підходу до формування вантажного плану контейнеровозу можлива шляхом створення СППР судноводія. Застосування такої системи не потребуватиме її глибокої інтеграції з загальносудовими системами (необхідне лише початкове завдання технічних характеристик судна та конструктивних особливостей розміщення вантажу), оскільки вона виконуватиме лише інформаційно-дорадчі функції, а остаточне рішення з визначення кінцевого варіанту вантажного плану залишатиметься за судноводієм.

Слід зауважити, що при розробці математичних моделей і методів, які використовуються для формування вантажного плану, також необхідно обов'язково враховувати їх обчислювальну складність, оскільки вона суттєво впливає на придатність з точки зору практичної реалізації та розробку відповідних програмних засобів.



**Перспективи подальших досліджень.**

Проведені дослідження показали необхідність удосконалення і подальшого розвитку моделей і методів керування процесами завантаження контейнеровозів у зв'язку із збільшенням обсягів світових контейнерних перевезень та ускладненням логістичних ланцюжків транспортування товарів. Приймаючи до уваги наявні обчислювальні можливості сучасних персональних комп'ютерів, пріоритетним напрямом досліджень постає розвиток евристичних та імітаційних методів оптимізації. Також у зв'язку із наявною тенденцією до зростання розмірів і контейнеромісткості суден, посиленням вимог до формування їх вантажних планів, а також керування вантажними операціями в цілому, перспективним є створення спеціалізованих автоматизованих систем керування вантажними операціями з елементами СППР, що дозволить підвищити безпеку виконання вантажних операцій та економічну ефективність виконання рейсів суднами-контейнеровозами.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Ambrosino D., Sciomachen A., Tanfani E. Stowing a containership: the master bay plan problem. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2004. № 38.2. P. 81–99.
2. Dubrovsky O., Levitin G., Penn, M. A genetic algorithm with a compact solution encoding for the containership stowage problem. *Journal of Heuristics*. 2002. Vol. 8. No. 6. P. 585–599.
3. Fan L., Low M. Y. H., Hsu W. J., Huang Sh. Y., Zeng M., Win Ch. A. Randomized algorithm with tabu search for multi-objective optimization of large containership stowage plans. *International Conference on Computational Logistics*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2011. P. 256–272.
4. Hernández Hernández P., Cruz-Reyes L., Melin P., Mar-Ortiz J., Joaquín Fraire Huacuja H., José Puga Soberanes H, Javier González Barbosa J. An Ant Colony Algorithm for Improving Ship Stability in the Containership Stowage Problem. *MICAI 2013: Mexican International Conference on Artificial Intelligence*, 2013. P. 93–104.
5. Yurtseven M. A., Boulougouris E., Turan O. Container ship stowage plan using steepest ascent hill climbing, genetic, and simulated annealing algorithms. *Marine Design XIII*. 2018. vol. 1. P. 617–623.
6. Rahsed D. M., Gheith M. S., Eltawil A. B. A Rule-based Greedy Algorithm to Solve Stowage Planning Problem. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, December 2018. P. 437–441.
7. Matsaini, Santosa B. Solving the container stowage problem (CSP) using particle swarm optimization (PSO). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018. vol. 337, article no. 012002.
8. Kim K. H., Kang J. S., Ryu K. R. A beam search algorithm for the load sequencing of outbound containers in port container terminals[J]. *OR Spectrum*. 2004. vol. 26. no. 1. P. 93–116.
9. Камєнєв К. І., Камєнєва А. В. Використання адитивного алгоритму для розміщення небезпечних вантажів на контейнерному судні. *Судовождение*. 2018. № 28. С. 70–77.
10. Li F., Tian C., Cao R., Ding W. An Integer Linear Programming for Container Stowage Problem. In: Bubak M., van Albada G.D., Dongarra J., Sloot P.M.A. (eds) *Computational Science – ICCS 2008*. ICCS 2008. *Lecture Notes in Computer Science*. vol. 5101. Springer, Berlin, Heidelberg. P. 853–862.
11. Накул Ю. О., Математична модель остійності судна при розподілі ваги контейнерів. *Наукові праці ЧНУ ім. Петра Могили. Серія: “Комп'ютерні технології”*. 2018. Вип. 305. Т. 317. С. 18–22.
12. Yaagoubi A. E., Alaoui E. H., Boukachour J. Multiobjective river-sea-going container barge stowage planning problem with container fragility and barge stability factors. *GOL 2018 : The 4th International Conference on Logistics Operations Management*. 10–12 Apr. 2018. Le

Havre, France. IEEE : 2018. P. 214–230.

13. Azevedo A. T., Neto L. L. S., Chaves A. A., Moretti A. C. Solving the 3D stowage planning problem integrated with the quay crane scheduling problem by representation by rules and genetic algorithm. *Applied So Computing Journal*. 2018. vol. 65. P. 495–516.

14. Цимбал М. М. Формування плану завантаження контейнеровозу. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2020. №1(22). С. 64–73.

15. Бень А. П., Федоров А. І. Формування вантажного плану контейнеровозу при здійсненні мультипортових перевезень. *Судноводіння*. 2019. №29. С. 10–19.

16. Федоров А. І. Метод формування субоптимального вантажного плану контейнеровозу. *Проблеми інформаційних технологій*. 2019. №25. С. 96–100.

17. Цымбал М. Н. Формирование тензора загрузки контейнеровоза в случае проведения грузовых операций в нескольких портах. *Судноводіння*. 2019. Вип. 29. С. 35–41.

## REFERENCES

1. Ambrosino, D., Sciomachen, A., Tanfani, E. (2004). Stowing a containership: the master bay plan problem. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2004. № 38.2. P. 81–99.

2. Dubrovsky, O., Levitin, G., Penn, M. (2002). A genetic algorithm with a compact solution encoding for the containership stowage problem. *Journal of Heuristics*. Vol. 8. No. 6. P. 585–599.

3. Fan, L., Low, M. Y. H., Hsu, W. J., Huang, Sh. Y., Zeng, M., Win, Ch. A. (2011). Randomized algorithm with tabu search for multi-objective optimization of large containership stowage plans. *International Conference on Computational Logistics*. Springer, Berlin, Heidelberg. P. 256–272.

4. Hernández Hernández, P., Cruz-Reyes, L., Melin, P., Mar-Ortiz, J., Joaquín Fraire Huacuja, H., José Puga Soberanes, H, Javier González Barbosa, J. (2013). An Ant Colony Algorithm for Improving Ship Stability in the Containership Stowage Problem. *MICAI 2013: Mexican International Conference on Artificial Intelligence*. P. 93–104.

5. Yurtseven, M. A., Boulougouris, E., Turan, O. (2018). Container ship stowage plan using steepest ascent hill climbing, genetic, and simulated annealing algorithms. *Marine Design XIII*. vol. 1. P. 617–623.

6. Rahsed, D. M., Gheith, M. S., Eltawil, A. B. (2018). A Rule-based Greedy Algorithm to Solve Stowage Planning Problem. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, December. P. 437–441.

7. Matsaini, Santosa B. (2018). Solving the container stowage problem (CSP) using particle swarm optimization (PSO). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. vol. 337, article no. 012002.

8. Kim, K. H., Kang, J. S., Ryu, K. R. (2004). A beam search algorithm for the load sequencing of outbound containers in port container terminals[J]. *OR Spectrum*. vol. 26. no. 1. P. 93–116.

9. Kamieniev, K. I., Kamienieva, A. V. (2018). Vykopyctannia adytyvnoho alhopytmu dlia pozmishchennia nebezpechnykh vantazhiv na konteinerному cudni. *Cudovozhdenye*. № 28. S. 70–77.

10. Li, F., Tian, C., Cao, R., Ding, W. (2008). An Integer Linear Programming for Container Stowage Problem. In: Bubak M., van Albada G. D., Dongarra J., Sloot P. M. A. (eds) *Computational Science – ICCS 2008*. ICCS 2008. *Lecture Notes in Computer Science*. vol. 5101. Springer, Berlin, Heidelberg. P. 853–862.

11. Nakul, Yu. O. (2018). Matematychna model ostiinosti sudna pry rozpodili vahy konteineriv. *Naukovi pratsi ChNU im. Petra Mohyly*. Seria: “Kompiuterni tekhnolohii”. Vyp. 305. T. 317. S. 18–22.

12. Yaagoubi, A. E., Alaoui, E. H., Boukachour, J. (2018). Multiobjective river-sea-going container barge stowage planning problem with container fragility and barge stability factors. *GOL*

2018 : *The 4th International Conference on Logistics Operations Management*. 10–12 Apr. 2018. Le Havre, France. IEEE : P. 214–230.

13. Azevedo, A. T., Neto, L. L. S., Chaves, A. A., Moretti, A. C. (2018). Solving the 3D stowage planning problem integrated with the quay crane scheduling problem by representation by rules and genetic algorithm. *Applied So Computing Journal*. vol. 65. P. 495–516.

14. Tsymbal, M. M. (2020). Formuvannia planu zavantazhennia konteinerovoza. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*. №1(22). S. 64–73.

15. Ben, A. P., Fedorov, A. I. (2019). Formuvannia vantazhnoho planu konteinerovoza pry zdiisneni multyportovykh perevezen. *Sudnovodinnia*. №29. S. 10–19.

16. Fedorov, A. I. (2019). Metod formuvannia suboptimalnoho vantazhnoho planu konteinerovoza. *Problemy informatsiinykh tekhnolohii*. №25. S. 96–100.

17. Tsymbal, M. N. (2019). Formirovaniye tenzora zagruzki konteynerovoza v sluchaye provedeniya gruzovykh operatsiy v neskol'kikh portakh. *Sudnovodinnia*. Vip. 29. S. 35–41.

**Ben A. P., Sokolov A. V. ANALYSIS OF THE CURRENT STATUS OF THE METHODS OF CONTAINER CARGO PLANS FORMATION AND WAYS OF THEIR FURTHER IMPROVEMENT**

*The article is devoted to optimization of container carriers' cargo plans in the conditions of multiport container transportation. A comparative analysis of the existing methods of formation and optimization of container carriers' cargo plans was carried out, and the advantages and disadvantages of the practical application of each method were determined. The potential problems that arise during the practical application of the considered analytical and heuristic methods are emphasized. A number of mandatory conditions that must be met when drawing up the cargo plan of container carriers and the ways of their application as restrictions when solving a multi-criteria optimization problem are defined. The peculiarities of the process of building container carriers' cargo plans during multiport container transportation are analyzed and the choice of the best method for solving the task of optimizing the structure of the ship's cargo plan under the specified conditions is substantiated. The perspective of using multi-stage adaptive methods for optimizing cargo plans of container carriers is shown.*

*An adaptive multi-stage method of forming the optimal cargo plan of the vessel has been developed and the functions of the decision-making support system of the shipmaster for its practical implementation have been determined. The criteria for evaluating the quality of optimization of the ship's cargo plan are proposed. Prospective ways of further development and improvement of methods of forming plans of container carriers in modern conditions are considered.*

**Key words:** container ship cargo plan; multi-criteria optimization methods; multi-port transportation; decision support systems; ship control; safety navigation.

© Бень А. П., Соколов А. В.

Статтю прийнято  
до редакції 12.12.2023