

ОПТИМІЗАЦІЯ МАРШРУТУ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ В РАМКАХ РЕАЛІЗАЦІЇ СТРАТЕГІЇ СУДНОПЛАВНОЇ КОМПАНІЇ

Статтю присвячено створенню ефективної методики оптимізації маршруту доставки різномірних вантажів в міжнародних нелінійних регулярних перевезеннях для мінімізації витрат судноплавної компанії в рамках реалізації обраної стратегії. В роботі модифіковано алгоритм методу «майже оптимальних планів» для забезпечення отримання оптимального розв'язку при будь-яких вихідних умовах.

Ключові слова: стратегія, нелінійні регулярні перевезення, оптимізація маршруту доставки вантажу, лінійне програмування, метод «майже оптимальних планів».

Статья посвящена созданию эффективной методики оптимизации маршрута доставки разнородных грузов в международных нелинейных регулярных перевозках для минимизации затрат судоходной компании в рамках реализации выбранной стратегии. В работе модифицирован алгоритм метода «почти оптимальных планов» для получения оптимального решения при произвольных исходных условиях.

Ключевые слова: стратегия, нелинейные регулярные перевозки, оптимизация маршрута доставки грузов, линейное программирование, метод «почти оптимальных планов».

The article deals with the method of efficient technique for the mixed cargo delivery route optimization in cross-border nonlinear scheduled operations for costs' minimization within the shipping company strategy selected. The algorithm of «almost optimal plans» is modified in order to gain optimal result for any primary conditions.

Key words: strategy, nonlinear scheduled operations, delivery route optimization, linear programming, method of «nearly optimal plans».

Постановка проблеми в загальному виді та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями. В умовах падіння кон'юнктури ринку перевезення вантажів в міжнародному сполученні посилилася конкуренція між судноплавними компаніями. Тому українським компаніям, які і раніше мали слабку конкурентну позицію на ринку, слід обрати таку стратегію, яка забезпечить їм вихід на міжнародний ринок перевезень. В рамках цієї стратегії слід оптимізувати всі стадії транспортного процесу для мінімізації витрат і максимізації прибутків, в тому числі маршрут доставки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблеми маршрутизації на транспорті викладені в роботах Є.М. Воевудського, М.О. Конєвцевої, Г.С. Махуренко [10], Е.П. Громова [3], І.П. Тарасової [6; 7].

Визначення частини проблеми, що не вирішена раніше. Практична задача оптимізації маршруту доставки вантажів в своїй постановці відрізняється від класичної транспортної задачі [1; 4; 8] і не вирішується стандартними методами лінійного програмування. Представниками наукової школи Одеського національного морського університету розроблений алгоритм методу «майже оптимальних планів» на основі методів розв'язку транспортної задачі [3; 6; 7; 10], але цей алгоритм в деяких випадках не дає оптимального розв'язку, тому його слід модифікувати для отримання розв'язку задачі оптимізації маршруту доставки вантажів.

Ціль даної статті. Метою даної статті є створення ефективної методики оптимізації маршруту перевезення різномірних вантажів (в тому числі сільськогосподарського призначення)

в міжнародних нелінійних і лінійних регулярних перевезеннях для мінімізації витрат операційної діяльності, що дозволяє отримати оптимальний результат незалежно від початкових умов.

Викладення основного змісту статті. Задачу слід розв'язувати за умови, що на балансі підприємства числиться обмежена кількість суден, придатних для морських перевезень. Якщо ці судна неспроможні виконати довготерміновий план вантажоперевезень, постає питання про поповнення флоту пароплавства. Задача полягає у визначенні кількості суден діючого типу, а також суден, які слід придбати з тим, щоб забезпечити заплановані перевезення вантажів з найбільшою ефективністю. За критерій оптимальності приймається показник чистої валютної виручки.

Математична модель задачі має вигляд (1):

$$Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \Delta F_{ij} x_{ij} \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m P_{ij} x_{ij} = Q_j \quad (j = 1, 2, \dots, n); \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = k_i \quad (i = 1, 2, \dots, m'); \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq k_i \quad (i = m' + 1, m' + 2, \dots, m); \quad (4)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n), \quad (5)$$

де: x_{ij} – число суден i -го типу на j -й схемі руху;
 ΔF_{ij} – річна чиста валютна виручка при експлуатації одного судна i -го типу на j -й схемі руху, тис. дол.;
 P_{ij} – річна провізна здатність одного судна i -го типу на j -й схемі руху, тис. т;
 Q_j – річний обсяг перевезень на j -й схемі руху, тис. т;
 k_i – число суден i -го типу;
 m' – число діючих типів суден;
 m – число всіх типів суден (діючих і претендентів на поповнення);
 n – число схем руху.

Економічне значення обмежень наступне:

- (2) – обсяг перевезень на всіх схемах руху повинен бути освоєний;
- (3) – діючі судна повинні повністю використовуватися на перевезеннях;
- (4) – число суден нових типів не повинне перевищувати можливості суднобудівних заводів;
- (5) – умова невід'ємності змінних.

Конкретні значення величин ΔF_{ij} , P_{ij} , k_i , Q_j , n визначаються в процесі розв'язання конкретної задачі.

Розв'язання задачі оптимізації схем руху суден передбачає:

- розрахунок тоннажо-потоків;
- оптимізацію переходу тоннажу в баласті;
- побудову оптимальних схем руху;
- підготування вихідних даних для розв'язання задачі (2.1) – (2.5).

Середня питома вантажомісткість суден, m^3/t , обчислюється за формулою:

$$\bar{w} = \frac{\sum_{i=1}^m W_i}{\sum_{i=1}^m D_i^n}, \quad (6)$$

де: W_i – вантажомісткість судна i -го типу, m^3 ;
 D_i^n – паспортна чиста вантажопідйомність судна i -го типу, т;
 m – число типів суден.

Коефіцієнти перерахування вантажопотоків на ділянках руху в тоннажо-потоки визначаються таким чином:

$$k_l = \begin{cases} u_l / \bar{w}, & \text{якщо } u_l > \bar{w}, \\ 1, & \text{якщо } u_l \leq \bar{w}, \end{cases} \quad (7)$$

де: u_l – вантажний об'єм вантажу на ділянці l , m^3/t ;
 \bar{w} – середня питома вантажомісткість суден, m^3/t .

Вантажопотоки на ділянках перераховуються в тоннажо-потоки:

$$D_l = k_l Q_l \quad (l = 1, 2, \dots, h), \quad (8)$$

де: D_l – тоннажо-потік на ділянці l , тис. т;

Q_l – вантажопотік на ділянці l , тис. т;

k_l – коефіцієнт перерахування вантажопотоку на ділянці l в тоннажо-потік.

Для визначення портів з лишком і нестачею тоннажу будується коса таблиця навантажених тоннажо-потоків, до якої заносяться розраховані тоннажо-потоки D_l ($l = 1, 2, \dots, h$). Для кожного порту визначається різниця між прибулим і відправленим тоннажем, яка записується в діагональні клітинки. Якщо різниця додатна, то в даному порту є надлишок тоннажу, незабезпеченого вантажем, тобто є «запас» баластного тоннажу. Якщо різниця від'ємна, то даному порту необхідний баластний тоннаж, адже в ньому є вантаж, незабезпечений тоннажем.

Розв'язується задача оптимізації переходу тоннажу в баласті. В загальному вигляді математична модель задачі є такою:

$$Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n L_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i \quad (i = 1, 2, \dots, m), \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j \quad (j = 1, 2, \dots, n), \quad (11)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n), \quad (12)$$

де: x_{ij} – кількість тоннажу, який прямує в баласті з i -го порту з надлишком тоннажу до j -го порту з його нестачею;

a_i – «запас» тоннажу, незабезпеченого вантажем в i -му порту;

b_j – потреба в тоннажі в j -му порту;

L_{ij} – відстань між портами i та j .

Значення a_i і b_j беруться з косої таблиці навантажених тоннажо-потоків.

Задача (9) – (12) належить до класу транспортних задач і розв'язується методом потенціалів [1; 5]. Для складення початкового опорного плану (матриці планування) доцільно застосувати метод мінімального елемента [9].

Для побудови оптимальних схем руху тоннажу оптимальний план баластних переходів переноситься з матриці планування до косої таблиці кореспонденції тоннажо-потоків. Далі будуються схеми руху відповідно до наступних умов:

- схеми руху повинні бути замкненими, тобто судна мають повернутись до порту, з якого вони вийшли;

- кожний порт може входити до схеми тільки один раз, за виключенням початкового порту, який водночас є й кінцевим;
- в схемі не може бути два або більше поспіль баластних переходів;
- схеми повинні бути врівноважені за тоннажем на всіх ділянках схеми.

Визначення схем руху виконується в наступній послідовності:

- спочатку будуються прості (між двома портами) схеми, врівноважені за тоннажем, з вантажем на обох ділянках (якщо такі існують);
- далі переходять до побудови схем, які містять баластні переходи.

Щоб від тоннажо-потоків на ділянках схем руху D_{ij} перейти до вантажопотоків Q_{ij} , потрібно скористатися співвідношенням:

$$Q_{ij} = \frac{D_{ij}}{k_l} \quad (l \in j; j = 1, 2, \dots, n), \quad (13)$$

де: D_{ij} – кількість тоннажу, який прямує за l -ою ділянкою схеми j , тис. т;

Q_{ij} – кількість вантажу, який прямує за l -ою ділянкою схеми j , тис. т;

k_l – коефіцієнт перерахування вантажопотоку на ділянці l в тоннажо-потік.

Визначається кількість вантажу Q_j ($j = 1, 2, \dots, m$), який підлягає перевезенню за j -ю схемою, шляхом підсумовування кількості вантажу по всіх навантажених ділянках, що входять до даної схеми. Ці величини слугуватимуть правими частинами обмежень (2) при розв'язанні задачі визначення програми поповнення флоту.

Готуються вихідні дані для розв'язання задачі оптимізації структури флоту. Для суден універсального призначення розраховується питома вантажомісткість судна w_i , m^3/t :

$$w_i = \frac{W_i}{D_i^n}, \quad (14)$$

де: W_i – вантажомісткість судна i -го типу, m^3 ;

D_i^n – паспортна вантажопідйомність судна i -го типу, т.

Визначається P_{ij}^p – завантаження судна i -го типу на l -й ділянці, т. Для суден універсального призначення:

$$P_{ij}^p = \begin{cases} D_i^n, & u_l \geq w_i, \\ W_i / u_l, & u_l < w_i, \end{cases} \quad (15)$$

де u_l – вантажний об'єм вантажу на ділянці l , m^3/t ; для суден-контейнеровозів:

$$P_{ij}^p = p_l N_i = \begin{cases} q N_i, & u_l \leq w^k, \\ \frac{\omega}{u_l} N_i, & u_l > w^k, \end{cases} \quad (16)$$

де: N_i – контейнеромісткість i -го типу судна, шт.;

p_l – завантаження одного контейнера на ділянці l , т;

W^k – питома вантажомісткість контейнера, $w^k = 2 m^3/t$ [36];

q – вантажопідйомність контейнера, $q = 18 t$ [36];

w – вантажомісткість контейнера; для 20-футового контейнера $w = 36 m^3$ [37].

Провізна спроможність одного судна на схемі руху за рейс визначається як сума завантажень на навантажених ділянках, що входять до схеми:

$$P_{ij}^p = \sum_{l \in j} P_{il}^p \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n). \quad (17)$$

Визначається час стоянки t_{ij}^{ct} за формулою:

$$t_{ij}^{ct} = \sum_{l \in j} \left(\frac{P_{il}^p}{M_{il}^a} + \frac{P_{il}^b}{M_{il}^b} \right), \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n, \quad (18)$$

де M_{il}^a, M_{il}^b – валова інтенсивність обробки судна, завантаження в початковому порту ділянки i вивантаження в кінцевому, тонн на добу.

Ходовий час t_{ij}^x обчислюється за допомогою формули:

$$t_{ij}^x = \frac{L_j^r}{v_{ji}^r} + \frac{L_j^b}{v_{ji}^b}, \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n, \quad (19)$$

де: L_j^r, L_j^b – відповідно загальна протяжність переходів з вантажем i в баласті на j -й схемі руху, милі;

n_{ji}^r, n_{ji}^b – експлуатаційна швидкість судна i -го типу у вантажу i в баласті відповідно; $n_{ji} = 24 \times 0,9 \times n_{ti}$, миль/добу, де n_{ti} – технічна швидкість судна, вуз. (миль/год.).

Далі визначаються:

- загальний час рейса судна i -го типу на j -й схемі руху, діб:

$$t_{ij} = t_{ij}^x + t_{ij}^{cm}; \quad (20)$$

- число рейсів судна i -го типу на j -й схемі руху:

$$r_{ij} = \frac{T}{t_{ij}}, \quad (21)$$

де T – тривалість експлуатаційного періоду (вважаємо, що $T = 340$ діб);

- річна провізна спроможність судна кожного типу на кожній схемі руху:

$$P_{ij} = P_{ij}^p \cdot r_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n. \quad (22)$$

Розраховується чиста валютна виручка для кожного судна на кожній схемі руху за один рейс:

$$\Delta F_{ij}^p = \sum_{l \in j} P_{il}^p \cdot f_l - R_{ij}^p, \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n, \quad (23)$$

де: f_l – тарифна ставка на l -й ділянці, дол./т;

R_{ij}^p – витрати судна i -го типу на j -й схемі руху за рейс.

Потім визначається чиста валютна виручка для одного судна кожного типу на всіх схемах руху за рік:

$$\Delta F_{ij} = \Delta F_{ij}^p \cdot r_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n. \quad (25)$$

Нарешті, визначається кількість суден діючого типу:

$$k_i = \sum_{j=1}^n \frac{0,6 \cdot Q_j}{P_{ij}}. \quad (26)$$

Задача (1)–(5) визначення оптимальної структури флоту судноплавної компанії не розв'язується класичними методами лінійного програмування, тому для неї розроблено метод «майже оптимальних планів», але алгоритм цього методу не завжди дає оптимальних розв'язок. Покажемо, яким чином слід вдосконалити алгоритм методу «майже оптимальних планів» для отримання оптимального розв'язку.

Як приклад припустимо, що діючий тип судна – «Пула», суховантажне судно універсального призначення, яке більшою мірою використовується для перевезення генеральних і насипних вантажів. В майбутньому плановому періоді (році) задані перевезення на таких маршрутах (табл. 1).

Таблиця 1

Початкові дані про вантажопотоки

№ ділянки	Порт відправлення	Порт призначення	Кількість вантажу, тис. тонн в рік	Рід вантажу
1	Маріуполь	Коломбо	320	пшениця
2	Маріуполь	Бомбей	280	метал
3	Маріуполь	Рангун	230	трактори
4	Коломбо	Маріуполь	250	чай
5	Бомбей	Маріуполь	260	сухофрукти
6	Бомбей	Суец	300	чай

Характеристика вантажів, а також портів, трас і умов плавання дозволяє зробити наступні висновки щодо суден-претендентів на поповнення. Судна-претенденти повинні:

- належати до категорії суховантажних суден універсального призначення (ці судна придатні для виконання всіх заданих перевезень) або до контейнеровозів (придатні для виконання всіх заданих перевезень, за винятком перевезень металу з Маріуполя до Бомбея і чаю з Бомбея до Суеца);
- забезпечувати дальність плавання не менше 6044 миль (визначається відстанню між портами Маріуполь і Рангун, яка в задачі є максимальною);
- мати осадку не більше 9,75 м і довжину не більше 200 м (визначається можливостями порту Маріуполь, у якого серед даних портів вони найменші);
- належати до суден одного з льодових класів Л1, Л2, Л3, УЛ, УЛА (визначається умовами плавання в Азовському морі в зимовий час).

З урахуванням сформульованих вимог слід вибирати судна з відповідними техніко-експлуатаційними і економічними характеристиками.

Підстановкою початкових даних до формули (6), з урахуванням того, що вантажомісткість одного контейнера ISO-20 складає 36 м³, отримана середня питома вантажомісткість суден:

$$\bar{w} = \frac{20370 + 36 \cdot (218 + 304 + 400 + 730) + 11210 + 19570 + 20000 + 17036}{12300 + 3815 + 4800 + 6400 + 10950 + 6430 + 11750 + 11450 + 10136} = 1,892.$$

Коефіцієнти перерахування вантажопотоку на ділянках руху в тоннажо-потік визначались за формулою (7):

$$k_1 = k_2 = k_3 = 1, \quad k_4 = k_6 = \frac{3,46}{1,892} = 1,828, \quad k_5 = \frac{2,46}{1,892} = 1,300.$$

Вантажопотоки на ділянках (табл. 1) переводились в тоннажо-потоки за формулою (8):

$$\begin{aligned} D_1 &= k_1 Q_1 = 1 \cdot 320 = 320 \text{ тис. т;} \\ D_3 &= k_3 Q_3 = 1 \cdot 230 = 230 \text{ тис. т;} \\ D_5 &= k_5 Q_5 = 1,300 \cdot 260 \approx 338 \text{ тис. т;} \\ D_2 &= k_2 Q_2 = 1 \cdot 280 = 280 \text{ тис. т;} \\ D_4 &= k_4 Q_4 = 1,828 \cdot 250 \approx 457 \text{ тис. т;} \\ D_6 &= k_6 Q_6 = 1,828 \cdot 300 \approx 549 \text{ тис. т.} \end{aligned}$$

Тоннажо-потоки заносились до косої таблиці навантажених тоннажо-потоків (табл. 2).

Таблиця 2

Коса таблиця навантажених тоннажо-потоків

№	Порти	Маріуполь	Коломбо	Бомбей	Рангун	Суец	Всього відправлено, тис. т
1	Маріуполь	- 35	320	280	230		830
2	Коломбо	457	- 137				457
3	Бомбей	338		- 607		549	887
4	Рангун				+ 230		0
5	Суец					+ 549	0
Всього прибуло, тис. т		795	320	280	230	549	2174

Таким чином, порти з нестачею баластного тоннажу: Маріуполь - -35 тис. т, Коломбо - -137 тис. т, Бомбей - -607 тис. т. Порти з надлишком баластного тоннажу: Рангун - 230 тис. т, Суец - 549 тис. т. Слід знайти такий розподіл тоннажу, при якому загальна кількість тоннажо-миль в баласті буде найменшою.

З урахуванням отриманих даних математична модель задачі визначення оптимального плану баластних переходів (9) - (12) прийме вигляд:

$$Z = 6044x_{11} + 1249x_{12} + 2117x_{13} + 1426x_{21} + 3401x_{22} + 2959x_{23} \rightarrow \min, \quad (27)$$

$$\left\{ \begin{aligned} x_{11} + x_{12} + x_{13} &= 230, \\ x_{21} + x_{22} + x_{23} &= 549, \\ x_{11} + x_{21} &= 35, \\ x_{12} + x_{22} &= 137, \\ x_{13} + x_{23} &= 607, \\ x_{ij} &\geq 0 \quad (i=1,2; j=1,2,3). \end{aligned} \right. \quad (28)$$

В табл. 3 представлено опорний план транспортної задачі [2; 9]. В правих верхніх кутах клітинок таблиці записано відстані між портами (в милях), в центрі клітинок - кількість тоннажу, який прямує в баласті з i-го порту з надлишком тоннажу до j-го порту з його нестачею.

Опорний план задачі

№	Порти відправлення	Потенціали	Порти призначення			Запаси тонажу a_i , тис. т
			Маріуполь (1)	Коломбо (2)	Бомбей (3)	
		$c_i \backslash v_j$	584	1249	2117	
1	Рангун	0	6044	1249	2117	230
				137	93	
2	Суец	842	1426	3401	2959	549
			35		514	
Потреби в тоннажі b_j , тис. т			35	137	607	

Задача (27) – (28) розв’язується методом потенціалів [5]. Початковий опорний план виявився оптимальним, тому подальші ітерації методу потенціалів не виконувались.

Для побудови оптимальних схем руху тоннажу оптимальний план баластних переходів переноситься з табл. 3 до косої таблиці кореспонденції тоннажопотоків (табл. 2). Вантажений тоннажопотік зазначено

у верхніх правих кутах табл. 4, баластний тоннаж – в лівих нижніх кутах.

Після переходу від тоннажопотоків на ділянках схем руху суден до вантажопотоків за допомогою формули (13), отримано оптимальні схеми руху (рис. 1). Суцільні стрілки відповідають переходам у вантажу, штрихові – переходам у баласті; над стрілками показано тоннажопотоки, а в дужках – вантажопотоки.

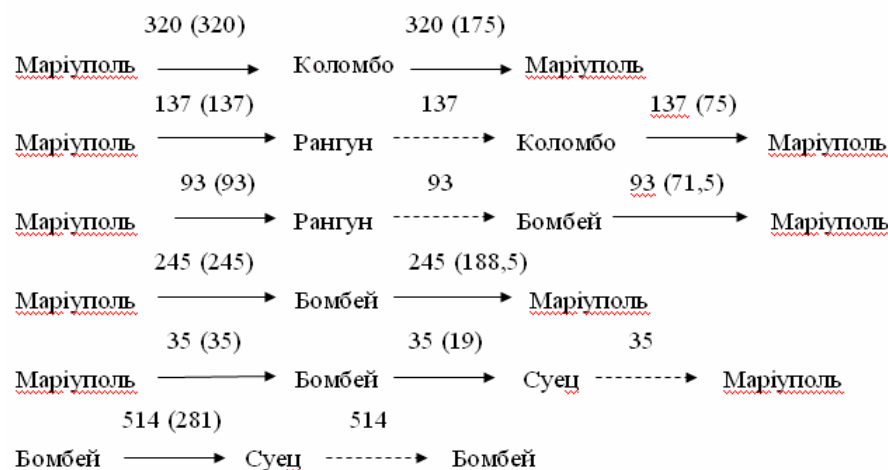


Рис. 1. Оптимальні схеми руху суден

Кількість вантажу Q_j ($j = 1, 2, \dots, 6$), що підлягає перевезенню по j -й схемі, є сумою кількостей вантажу по всіх навантажених ділянках, що належать даній схемі:

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= 320 + 175 = 495 \text{ (тис. т);} \\
 Q_2 &= 137 + 75 = 212 \text{ (тис. т);} \\
 Q_3 &= 93 + 71,5 = 164,5 \text{ (тис. т);} \\
 Q_4 &= 245 + 188,5 = 433,5 \text{ (тис. т);} \\
 Q_5 &= 35 + 19 = 54 \text{ (тис. т);} \\
 Q_6 &= 281 \text{ (тис. т).}
 \end{aligned}$$

Ці величини є правими частинами обмежень (2) при розв’язанні задачі визначення програми поповнення флоту.

Слід зазначити, що судна-контейнеровози не можуть бути використані для перевезень по 4-й, 5-й і 6-й схемам. Суховантажні судна універсального призначення можуть бути використані для перевезень по будь-якій зі схем.

Математична модель задачі визначення оптимальної структури флоту судноплавної компанії (1) – (5) набуває такого вигляду:

$$\begin{aligned}
 Z &= 2304x_{11} + 2188x_{12} + 2213x_{13} + 2141x_{14} + \\
 &+ 1624x_{15} + 1205x_{16} + 1603x_{21} + 1523x_{22} + 1569x_{23} + \\
 &+ 1545x_{24} + 1115x_{25} + 765x_{26} + 2256x_{31} + 2152x_{32} + \\
 &+ 2180x_{33} + 2130x_{34} + 1607x_{35} + 1178x_{36} + 2134x_{41} +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ 2011x_{42} + 2028x_{43} + 1979x_{44} + 1490x_{45} + 1072x_{46} + \\
 &+ 2145x_{51} + 2048x_{52} + 2088x_{53} + 2015x_{54} + 1528x_{55} + \\
 &+ 1103x_{56} + 1506x_{61} + 1426x_{62} + 1510x_{63} + 1456x_{64} + \\
 &+ 987x_{65} + 695x_{66} + 2113x_{71} + 1989x_{72} + 2098x_{73} + \\
 &+ 2033x_{74} + 1360x_{75} + 1035x_{76} + 2690x_{81} + 2607x_{82} + \\
 &+ 2711x_{83} + 2535x_{84} + 1738x_{85} + 1355x_{86} + 4215x_{91} + \\
 &+ 4148x_{92} + 4301x_{93} + 3846x_{94} + 2662x_{95} + 2273x_{96} \\
 &\rightarrow \max; \tag{29}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &90x_{11} + 63x_{21} + 88x_{31} + 84x_{41} + 84x_{51} + 58x_{61} + \\
 &+ 81x_{71} + 104x_{81} + 161x_{91} = 495; \\
 &75x_{12} + 52x_{22} + 74x_{32} + 69x_{42} + 70x_{52} + 49x_{62} + \\
 &+ 68x_{72} + 89x_{82} + 141x_{92} = 212; \\
 &79x_{13} + 56x_{23} + 78x_{33} + 72x_{43} + 75x_{53} + 54x_{63} + \\
 &+ 75x_{73} + 97x_{83} + 154x_{93} = 164,5; \tag{30} \\
 &109x_{14} + 78x_{24} + 108x_{34} + 100x_{44} + 102x_{54} + \\
 &+ 71x_{64} + 98x_{74} + 123x_{84} + 184x_{94} = 433,5; \\
 &107x_{15} + 73x_{25} + 106x_{35} + 98x_{45} + 101x_{55} + \\
 &+ 64x_{65} + 88x_{75} + 113x_{85} + 172x_{95} = 54; \\
 &69x_{16} + 44x_{26} + 67x_{36} + 61x_{46} + 63x_{56} + 40x_{66} + \\
 &+ 59x_{76} + 77x_{86} + 130x_{96} = 281;
 \end{aligned}$$

$$\sum_{j=1}^6 x_{1j} = 11; \tag{31}$$

$$\sum_{j=1}^6 x_{ij} \leq 6, \quad i = 2, 3, \dots, 9; \tag{32}$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = 2, 3, \dots, 9; j = 1, 2, \dots, 6. \quad (33)$$

Задача розв'язувалась методом «майже оптимальних планів». Умова задачі записувалась у вигляді таблиці (табл. 4).

В правих верхніх кутках клітинок записані дані про DF_{ij} – річний чистий валютний виручці по суднах кожного типу на всіх напрямках (в тис. дол.). Їх величини підсумовані по кожному напрямку перевезень і поміщені в графу «Сумарний річний дохід». В лівих нижніх кутках кліток записані річні провізні спроможності суден по кожному напрямку перевезень (в тис. т).

Визначалося і записувалося в графу «Коефіцієнт трудомісткості» I_j – відношення сумарної валютної виручки на кожному напрямку перевезень до максимальної сумарної валютної виручки серед всіх напрямків (в даному випадку нею виявилася перша схема руху). Перемноживши I_j і DF_{ij} , отримаємо t_{ij} – умовні річні доходи суден на напрямках з урахуванням порівняльної трудомісткості (в тис. дол.). Ці величини записані в лівих верхніх кутках клітинок.

Таблиця 4

Визначення оптимальної структури флоту

Типи суден	Схеми руху						Обмеження за кількістю суден	
	1	2	3	4	5	6		
Пула	2304 2188 90	2097 2188 75	2184 2213 79	2010 2141 109	1093 1624 107	614 1205 69	11	=
СО-7	1603 1603 63	1460 1523 52	1549 1569 56	1450 1545 78	750 1115 73	390 765 44	6	≤
СО-12	2256 2256 88	2062 2152 74	2152 2180 78	1999 2130 108	1082 1607 106	600 1178 67	6	≤
Известия	2134 2134 84	1927 2011 69	2002 2028 72	1857 1979 100	1003 1490 98	546 1072 61	6	≤
Варнемюнде	2145 2145 84	1962 2048 70	2061 2088 75	1891 2015 102	1028 1528 101	562 1103 63	6	≤
Сестрорецк	1506 1506 58	1367 1426 49	1491 1510 54	1366 1456 71	664 987 64	354 695 40	6	≤
А. Фадеев	2113 2113 81	1906 1989 68	2071 2098 75	1908 2033 98	916 1360 88	527 1035 59	6	≤
СКН-400	2690 2690 104	2498 2607 89	2676 2711 97	2379 2535 123	1170 1738 113	690 1355 77	6	≤
СКН-700	4215 4215 161	3975 4148 141	4245 4301 154	3609 3846 184	1791 2662 172	1158 2273 130	6	≤
Обсяг перевезень, тис. т	495	212	164,5	433,5	54	281		
Сумарний річний прибуток, тис. дол	20967	20092	20697	19679	14112	10681		
Коефіцієнт трудомісткості	1,000	0,958	0,987	0,939	0,673	0,509		
Залишок обсягу перевезень, тис. т	495	212	164,5	433,5	54	281		

В центрі кліток записувались значення x_{ij} – кількість суден і-го типу, задіяних для перевезень на j-й схемі руху. Оскільки, як було встановлено раніше, судна-контейнеровози не можна використовувати на схемах руху 4, 5, 6, відповідні клітки вважались «забороненими», в них записувався знак «мінус» і вони виключалися з розгляду при розв'язанні задачі.

Слід зазначити, що пряме рішення задачі із застосуванням методу «майже оптимальних планів» дало наступний результат: 5,6 суден типу СКН-700 слід використовувати на схемах руху 1, 2 і 3, а 8,6 суден типу «Пула» слід використовувати на схемах руху 4, 5 і 6. Це рішення неприйнятне, оскільки в цьому випадку не виконується

обмеження (3), значення якого полягає в тому, що всі судна діючого типу (в даному випадку – 11 штук) повинні бути задіяні для перевезень. Тому метод було модифіковано. З табл. 4 видно, що умовні річні прибутки суден по всіх схемах руху t_{ij} найбільші у суден типу «Пула» (серед суден універсального призначення) і СКН-700 (серед контейнеровозів). Тому можна застосувати метод «майже оптимальних планів» «у зворотному напрямку».

Розглянемо спочатку схеми руху з 4-ї по 6-ту. Тут серед «незаборонених клітинок» максимальне значення t_{ij} має клітинка (1,4) – $t_{14} = 2141$. Тому закріплюємо судна 1-го типу («Пула») за 4-м напрямом:

$$X_{14} = \min \{11; 433,5 / 109\} = 3,97.$$

Обсяг перевезень по 4-й схемі руху виконаний повністю, тому 4-й стовпець далі не розглядаємо. Для 5-ї та 6-ї схем руху серед «незаборонених клітинок» максимальне значення t_{ij} має клітинка (1,5) – $t_{15} = 1624$. Тому закріплюємо судна типу «Пула» за 5-м напрямом:

$$X_{15} = \min \{11; 54 / 107\} = 0,50.$$

Обсяг перевезень по 5-й схемі руху виконаний повністю, тому 5-й стовпець далі не розглядаємо. Для 6-ї схеми руху серед «незаборонених клітинок» максимальне значення t_{ij} має клітинка (1,6) – $t_{16} = 1205$. Тому закріплюємо судна типу «Пула» і за 6-м напрямом:

$$X_{16} = \min \{11; 281 / 69\} = 4,08.$$

Обсяг перевезень по 6-й схемі руху виконаний повністю, тому 6-й стовпець далі не розглядаємо. Таким чином, на схемах руху 4, 5 і 6 використовуються виключно судна типу «Пула» – 8,56 штук. Серед схем руху, що залишилися, максимальні значення t_{ij} – у суден типів СКН-700 і СКН-400. Проте необхідно ще використати ті, що залишилися ($11 - 8,56 = 2,44$) одиниці суден типу «Пула». Для цього вибираємо 2-у схему руху, де значення річних доходів t_{ij} – найменші:

$$X_{12} = \min \{2,44; 212 / 75\} = 2,44.$$

Обсяг перевезень по 2-й схемі руху виконаний повністю, тому 2-й стовпець далі не розглядаємо. Залишок обсягу перевезень по 2-й схемі руху складає $212 - 2,44 \times 75 = 28,65$ (тис. т). Розрахункова таблиця набуває такого вигляду (табл. 5).

Таблиця 5

Визначення оптимальної структури флоту. Крок 2

Типи суден	Схеми руху						Обмеження за кількістю суден	
	1	2	3	4	5	6		
Пула	2304 21887304 90	2097 2188 2,44 75	2184 2213 79	2010 2141 3,97 109	1093 1624 0,50 107	614 1205 4,08 69	11	=
СО-7	1603 1603 63	1460 1523 52	1549 1569 56	1450 1545 78	750 1115 73	390 765 44	6	≤
СО-12	2256 2256 88	2062 2152 74	2152 2180 78	1999 2130 108	1082 1607 106	600 1178 67	6	≤
Известия	2134 2134 84	1927 2011 69	2002 2028 72	1857 1979 100	1003 1490 98	546 1072 61	6	≤
Варнемюнде	2145 2145 84	1962 2048 70	2061 2088 75	1891 2015 102	1028 1528 101	562 1103 63	6	≤
Сестрорецк	1506 1506 58	1367 1426 49	1491 1510 54	1366 1456 71	664 987 64	354 695 40	6	≤
А. Фадеев	2113 2113 81	1906 1989 68	2071 2098 75	1908 2033 98	916 1360 88	527 1035 59	6	≤
СКН-400	2690 2690 104	2498 2607 89	2676 2711 97	2379 2535 123	1170 1738 113	690 1355 77	6	≤
СКН-700	4215 4215 161	3975 4148 141	4245 4301 154	3609 3846 184	1791 2662 172	1158 2273 130	6	≤
Обсяг перевезень, тис. т	495	212	164,5	433,5	54	281		
Сумарний річний прибуток, тис. дол	20967	20092	20697	19679	14112	10681		
Коефіцієнт трудомісткості	1,000	0,958	0,987	0,939	0,673	0,509		
Залишок обсягу перевезень, тис. т	495	28,65	164,5	0	0	0		

В тій частині таблиці, що залишилася, найбільше значення $t_{ij} = 4301$ знаходиться в клітинці (9,3). Тому закріплюємо судна 9-го типу СКН-700 за 3-м напрямком:

$$X_{93} = \min \{6; 164,5 / 154\} = 1,07.$$

Обсяг перевезень по 3-й схемі руху виконаний повністю, тому 3-й стовпець далі не розглядаємо. В перших двох стовпцях, що залишилися, найбільше значення $t_{ij} = 4215$ знаходиться в клітинці (9,1). Тому закріплюємо судна 9-го типу СКН-700 за 1-м напрямком:

$$X_{91} = \min \{6 - 1,07; 495 / 161\} = 3,07.$$

Обсяг перевезень по першій схемі руху виконаний повністю, тому перший стовпець далі не розглядаємо. В другому стовпці, що залишився, найбільше значення $t_{ij} = 4148$ знаходиться в клітинці (9,2). Тому закріплюємо судна 9-го типу СКН-700 за 2-м напрямком:

$$X_{92} = \min \{6 - 1,07 - 3,07; 28,65 / 161\} = 0,20.$$

Обсяг перевезень по 1-й схемі руху виконаний повністю. Розрахункова таблиця приймає вигляд (табл. 6).

Таблиця 6

Визначення оптимальної структури флоту. Крок 3

Типи суден	Схеми руху						Обмеження за кількістю суден	
	1	2	3	4	5	6		
Пула	2304 2188 90	2097 2188 2,44 75	2184 2213 79	2010 2141 3,97 109	1093 1624 0,50 107	614 1205 4,08 69	11	=
СО-7	1603 1603 63	1460 1523 52	1549 1569 56	1450 1545 78	750 1115 73	390 765 44	6	≤
СО-12	2256 2256 88	2062 2152 74	2152 2180 78	1999 2130 108	1082 1607 106	600 1178 67	6	≤
Известия	2134 2134 84	1927 2011 69	2002 2028 72	1857 1979 100	1003 1490 98	546 1072 61	6	≤
Варнемюнде	2145 2145 84	1962 2048 70	2061 2088 75	1891 2015 102	1028 1528 101	562 1103 63	6	≤
Сестрорецк	1506 1506 58	1367 1426 49	1491 1510 54	1366 1456 — 71	664 987 — 64	354 695 — 40	6	≤
А. Фадеев	2113 2113 81	1906 1989 68	2071 2098 75	1908 2033 — 98	916 1360 — 88	527 1035 — 59	6	≤
СКН-400	2690 2690 104	2498 2607 89	2676 2711 97	2379 2535 — 123	1170 1738 — 113	690 1355 — 77	6	≤
СКН-700	4215 4215 3,07 161	3975 4148 0,20 141	4245 4301 1,07 154	3609 3846 — 184	1791 2662 — 172	1158 2273 — 130	6	≤
Обсяг перевезень, тис. т	495	212	164,5	433,5	54	281		
Сумарний річний прибуток, тис. дол	20967	20092	20697	19679	14112	10681		
Коефіцієнт трудомісткості	1,000	0,958	0,987	0,939	0,673	0,509		
Залишок обсягу перевезень, тис. т	0	0	0	0	0	0		

Таким чином, отримано наступний розв'язок задачі: на 1-й, 2-й і 3-й схемах руху використовуються 4 (3,07 + 0,2 + 1,07 = 4,34 ≈ 4) судна-контейнеровоза СКН-700, а на 2-й, 4-й, 5-й і 6-й схемах руху – 11 суден діючого типу «Пула». При такому розв'язку виконуються всі обмеження.

Чиста виручка при освоєнні заданих вантажопотоків складає: $4215 \times 3,07 + 4148 \times 0,2 + 4301 \times 1,07 +$

$$2188 \times 2,44 + 2141 \times 3,97 + 1624 \times 0,50 + 1205 \times 4,08 = 37938,6 \text{ (тис. дол.)}$$

Висновки.

1. Оптимізація маршруту доставки вантажів є досить складним процесом, необхідним для мінімізації витрат та максимізації прибутків судноплавної компанії, що є обов'язковою умовою забезпечення конкурентоспроможності на міжнародному ринку.

2. Існуючі методи лінійного програмування, зокрема, транспортна задача в класичній постановці не відповідає практичній задачі оптимізації маршруту доставки вантажів, оскільки не враховує наявність баластних переходів та часу доставки вантажів.

3. Розроблений для розв'язку цієї задачі метод «майже оптимальних планів» не є строго

оптимізаційним методом і не завжди призводить до знаходження оптимального результату через невиконання обмежень задачі.

4. В роботі була запропонована модифікація методу «майже оптимальних планів», що базується на вдосконаленні його алгоритму таким чином, щоб забезпечувати оптимальний розв'язок за будь-яких вихідних умовах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бережная Е.В., Бережной В.И. Математические методы моделирования экономических систем. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 368 с.
2. Вітлінський В.В., Наконечний С.І., Терещенко Т.О. Математичне програмування. – К.: КНЕУ, 2001. – 248 с.
3. Громовой Э.П. Математические методы и модели в планировании и управлении на морском транспорте. – М.: Транспорт, 1979. – 360 с.
4. Зайченко Ю.П. Исследование операций. – К.: Вища школа, 1975. – 320 с.
5. Кузнецов Ю.Н., Кузубов В.И., Волощенко А.Б. Математическое программирование. – М.: Высшая школа, 1980. – 302 с.
6. Тарасова И.П. Введение в исследование операций в транспортных системах. – Одесса: ОГМУ, 2000. – 58 с.
7. Тарасова И.П. Задачи транспортного типа. – Одесса: ОГМУ, 1999. – 50 с.
8. Фомин Г.П. Математические методы и модели в коммерческой деятельности. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 544 с.
9. Шикин Е.В., Чхартишвили А.Г. Математические методы и модели в управлении. – М.: Дело, 2002. – 440 с.
10. Экономико-математические методы и модели в управлении морским транспортом / Е.Н. Воевудский, Н.А. Коневцева, Г.С. Махуренко, И.П. Тарасова. – М.: Транспорт, 1988. – 381 с.

Рецензенти: Казарезов А.Я., д.т.н., професор;
Верланов Ю.Ю., к.е.н., професор.

© Белова Н.М., 2010

Дата надходження статті до редколегії 21.12.2009 р.