

РОЗВ'ЯЗАННЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ ЗАДАЧІ З УРАХУВАННЯМ ОБМЕЖЕНЬ ЛОГІСТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

Здійснення військових перевезень усіма видами транспорту передбачає планування, управління, розгортання транспортних комунікацій, розподіл та підготовку видів транспорту, організацію перевезення військ і транспортування військового майна, евакуацію поранених та хворих, пошкодженого озброєння і військової техніки, трофейного майна. В результаті цих дій має бути вирішене питання своєчасної доставки матеріально-технічних засобів з найменшими витратами.

Для вирішення задачі раціонального розподілу доставки матеріально-технічних засобів в умовах оперативного переміщення пунктів зберігання та споживачів, зміни маршрутів постачання та виду транспортних засобів доставки, пропонується розв'язання мультимодальної (трьохіндексної біпланарної) транспортної задачі з урахуванням обмежень логістичних показників: час постачання; наявна вантажопідйомність транспортних засобів різних видів та загальна вартість перевезень. Введення додаткових обмежень в трьохіндексну біпланарну транспортну задачу перетворює її в задачу лінійного програмування загального вигляду. Представлено математичну постановку трьохіндексної транспортної задачі з додатковими логістичними обмеженнями. Надано форму представлення вихідних даних у вигляді розширених транспортних таблиць вартостей перевезень та витрат часу на перевезення вантажів. Показано зручний спосіб розв'язання такої задачі симплекс-методом в надбудові «Пошук розв'язання» табличного процесору Microsoft Excel.

В статті наводяться результати розв'язання мультимодальної транспортної задачі з логістичними обмеженнями в табличному процесорі Microsoft Excel на прикладі доставки матеріально-технічних засобів трьома видами транспорту (автомобільним, залізничним; річковим) з урахуванням обмежень за часом та вартістю доставки. У прикладі застосовані умовні вихідні дані щодо доставки вантажів з трьох міст (пунктів зберігання) до трьох інших міст (пунктів споживання) в межах України.

Ключові слова: військова логістика, мультимодальна транспортна задача, симплекс-метод, цільова функція, обмеження, план перевезень.

Вступ. Питання ефективності логістики пов'язують не лише з наявністю, зберіганням та раціональним розподілом матеріально-технічних засобів (МтЗ) серед споживачів. Найважливішою функцією є здійснення військових перевезень і транспортування усіма видами транспорту, яка полягає в організації планування, управління, розгортання транспортних комунікацій, розподілу та підготовці видів транспорту, організації перевезення військ і транспортування військового майна, евакуації поранених та хворих, пошкодженого озброєння і військової техніки, трофейного майна. Фактично ідеться про вирішення питання своєчасної доставки МтЗ з найменшими витратами.

В умовах сьогодення, під час війни, як ніколи є актуальним твердження, що сучасні війни – це війни економік, які мають найбільший потенціал, вміють враховувати та передбачати ефективність кожного ресурсу витраченого на війну та вкладеного у країну. Поряд з цим значна протяжність фронту, систематичне перегрупування військ та знищення об'єктів зберігання МтЗ висуває певні критерії щодо оперативності та вартості транспортування. Потрібно враховувати обмеження по часу, за який необхідно доставити МтЗ, забезпечуючи

найменшу вартість транспортування за рахунок оптимального вибору виду транспортного засобу (ТЗ) з наявного парку.

Таким чином, раціональність перевезень є ключовим фактором для забезпечення ефективної роботи транспортної системи. Організація перевезень передбачає розробку оптимальних маршрутів, раціональний розподіл наявних транспортних засобів різних видів для доставки МтЗ з мінімальними витратами на транспортування. Разом з цим має досягатися необхідна оперативність доставки військових вантажів до району призначення.

З метою спрощення роботи фахівців служби логістики з планування військових перевезень виникає потреба в інструментарії для розв'язання такої задачі, який повинен бути легкодоступним та простим у використанні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На початковому етапі організації перевезень значне місце відводиться розрахункам потреби в підвезенні МтЗ, можливостей транспорту і засобів механізації вантажно-розвантажувальних робіт [1]. Для виконання розрахунків з перевезень застосовуються методика, які мають урахувувати конкретну обстановку, характер і види дій, наявність вихідних даних, потрібну точність результатів розрахунків та наявний ліміт часу на планування. Розрахунки, виконані навіть за самими точними методиками, стають непотрібними, якщо результати отримані з запізненням. За наявності часу, розрахунки виконують за методиками, які дозволяють отримати задовільні для практики результати [2-4]. Точність розрахунків значною мірою визначається точністю вихідних даних, які можуть змінюватись у часі.

За обмежень у часі розрахунки, зазвичай, виконуються за допомогою комп'ютерної техніки за методиками, які дозволяють в короткі терміни і з допустимими похибками отримати необхідні результати.

В умовах функціонування територіальної системи логістичного забезпечення, наявні кілька джерел матеріального забезпечення, з яких можуть отримувати матеріальні засоби один або декілька одержувачів. Доставку МтЗ в межах України можливо здійснювати з використанням транспортних засобів різного виду: автомобільного; залізничного; водного, повітряного. Для врахування складних компромісів між різними видами транспорту більш доцільним стає використання мультимодальних перевезень, що інтегрують декілька видів транспорту. Звідси виникає задача оптимального розподілу обсягу перевезень МтЗ за видами транспорту під час проведення операцій оперативних угруповань військ. Розв'язання цієї задачі вкрай важливе з точки зору скорочення часу доставки МтЗ, досягнення мінімальних економічних витрат, ефективного використання наявних транспортних засобів. В рамках розв'язання такого класу задач мають бути попередньо обрані оптимальні маршрути доставки МтЗ з кожного пункту зберігання в пункти споживання для всіх видів транспорту. Для виконання таких розрахунків застосовуються методи теорії графів [5], методи лінійного і динамічного програмування [6-8], методи мережевого планування [9], генетичні алгоритми [10], методи нечіткого програмування [11, 12] та інші. За результатами таких розрахунків або за більш простими практичними розрахунками з урахуванням розкладу руху транспорту обмеженою кількістю можливих маршрутів [10], отримуються числові значення вартостей та часу доставки МтЗ з пунктів зберігання до пунктів споживання. При цьому мультимодальність перевезень також може передбачати наявність проміжних пунктів перевантаження вантажів з одного виду транспорту на інший [12]. В запропонованій нами статті такі варіанти постачання на розглядаються.

Після отримання вихідних даних про вартість і витрати часу на доставку між пунктами зберігання та споживання, наступним кроком є розв'язання задачі знаходження оптимального плану доставки МтЗ з пунктів зберігання в пункти споживання з використанням різних видів транспортних засобів. Для розв'язання таких задач широко застосовуються точні методи лінійного програмування (ЛП), а саме розв'язання транспортної задачі ЛП [13]. На відміну від класичної двохіндексної транспортної задачі щодо оптимального, з точки зору вартості доставки, розподілу однорідних вантажів з пунктів зберігання в пункти споживання,

застосування різних видів ТЗ перетворює її у трьохіндексну. Проблема розв'язання багатоіндексних транспортних і розподільних задач ЛП глибоко досліджувалися в [13]. Для випадку трьохіндексної транспортної задачі в [13] надані обчислювальні схеми та приклади її розв'язання. Важливим класом таких задач є трьохіндексні несиметричні транспортні задачі, для розв'язання яких не потрібно застосовувати загальні методи. Урахування специфіки задачі дозволяє отримати простий алгоритм розв'язання. В [13] сформульовано таку задачу та надано спосіб її розв'язання.

Модель задачі: знайти набір $\{x_{ijk}^*\}$, що мінімізує цільову функцію (ЦФ)

$$\min z(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p c_{ijk} x_{ijk}, \quad (1)$$

яка задовольняє обмеженням:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p x_{ijk} &= a_i, \quad i = 1, \dots, m, \\ \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^p x_{ijk} &= b_j, \quad j = 1, \dots, n, \\ x_{ijk} &\geq 0, \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n, \quad k = 1, \dots, p. \end{aligned} \quad (2)$$

Задача (1), (2) має назву трьохіндексної біпланарної транспортної задачі (Т-2Р) [13]. Необхідною та достатньою умовою існування розв'язку задачі Т-2Р є умова балансу

$$\sum_{j=1}^n b_j = \sum_{i=1}^m a_i = S.$$

В [13] показано, що суттєві індексні елементи оптимального плану цієї задачі відповідають мінімальним значенням коефіцієнтів цільової функції у кожній колонці матриці $\{c_{ijk}\}$, тобто за індексом $k = q_{ij}$. Згідно доведеної в [13] теореми оптимальний план $\{x_{ijk}^*\}$ задачі (1), (2) має наступну структуру:

$$x_{ijk}^* = \begin{cases} x_{ijk} > 0, & i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}, \quad k = q_{ij}; \\ 0, & i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}, \quad k \neq q_{ij}. \end{cases} \quad (3)$$

А мінімальне значення ЦФ

$$\min z(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p c_{ijk} x_{ijk}^*.$$

Властивість (3) задачі Т-2Р дозволяє замість вихідної трьохіндексної задачі (1), (2) розв'язувати допоміжну двохіндексну транспортну задачу будь-яким із відомих методів [13]. Модель транспортної задачі Т-2Р відповідає практичному випадку доставки військових вантажів з кількох пунктів зберігання кільком споживачам і її доцільно застосовувати для пошуку оптимального плану перевезень.

Приклади розв'язання мультимодальної транспортної задачі виду (1), (2) з побудовою опорних планів розглядаються в [4, 14]. В [15] розв'язання мультимодальної транспортної задачі реалізовано за допомогою програмних засобів MS Excel, Mathcad та Matlab. За результатами моделювання отримані ідентичні результати. На користь якого з програмних пакетів віддати перевагу залежить від зручності та швидкодії, особливо за умов зростання розмірності задачі.

Запропонована в [13, 14] постановка мультимодальної транспортної задачі Т-2Р є класичною. Однак, на практиці виникає потреба урахування додаткових обмежень на обсяги

можливих перевезень кожним з видів транспорту k з пункту i в пункт j , а також на витрати часу t_{ijk} на їх виконання.

В [7, 13] розглядається задача мінімізації часу T , за який постачання всіх вантажів буде завершено. Її постановка, як показано в [7], може бути аналогічною звичайній транспортній задачі, однак вагові коефіцієнти в цьому випадку є не транспортними витратами на одиницю маси вантажу, а часом постачання МТЗ з одного пункту зберігання до пункту споживання. Оптимальним буде такий план перевезень (x_{ij}) , за якого час T є мінімальним, тому ЦФ має вигляд

$$T = \max_{x_{ij} > 0} t_{ij} = \min. \quad (4)$$

В такій постановці задача не є задачею ЛП, оскільки величина T не є лінійною функцією змінних x_{ij} , які згідно (4) мають бути більшими за нуль. Така задача може бути розв'язана методом «заборонених клітинок» [7]. Сутність методу полягає у викреслюванні клітинок з найбільшим часом в транспортній таблиці та проведенням оптимізації за мінімумом ЦФ L , яке є мінімальною сумою добутоків для певного плану перевезень (x_{ij}) з обмеженням часу T

$$\min L = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij},$$

де c_{ij} – вагові коефіцієнти, які дорівнюють t_{ij} для клітинок з незмінними значеннями та $t_{ij} + M$ – для клітинок, в яких $t_{ij} > T$, з доданим великим числом M .

Представляє інтерес пошук розв'язку мультимодальної транспортної задачі Т-2Р за мінімумом вартості перевезень з додатковим урахуванням обмеження на час доставки МТЗ T , а також можливих обмежень на обсяги перевезень для різних видів ТЗ та їх вартість.

Метою статті є розв'язання мультимодальної транспортної задачі з додатковими логістичними обмеженнями щодо строків постачання МТЗ, обсягу перевезень вантажів для різних видів ТЗ та загальної вартості перевезень.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо постановку задачі (1), (2) з додатковими обмеженнями на обсяг перевезень для різних видів транспорту у вигляді

$$\sum_{j=1}^n x_{ijk} \leq d_{ik}, i = 1, \dots, m, k = 1, \dots, p, \quad (5)$$

де d_{ik} – загальна вантажопідйомність k -го виду транспорту, який застосовується для одноразового перевезення МТЗ з i -го пункту зберігання усім n споживачам.

В таблиці транспортних витрат для кожного пункту зберігання замість одного рядка для двохіндексної транспортної задачі пропонується ввести p рядків для наявних видів транспорту. Також додамо стовпчик з наявними вантажопідйомностями d_{ik} для кожного виду транспорту. Таблиця витрат для випадку $p = 3$ матиме вигляд, як показано на рис. 1.

Транспортна таблиця для розв'язку задачі матиме аналогічний вигляд (рис. 2). Однак, якщо в таблиці на рис. 1 у стовпчику D_n наведені наявні вантажопідйомності d_{ik} , то на рис. 2. у стовпчику D_v вантажопідйомності d_{ik} є використаними вантажопідйомностями для всіх видів транспорту в кожному з пунктів зберігання. Тобто в цій таблиці вони є сумою мас відповідного рядка згідно з (5) для випадку рівності, наприклад, для першого рядка $d_{11} = \sum_{j=1}^n x_{1j1}$. Введення

додаткових обмежень (5) перетворює задачу Т-2Р в задачу ЛП загального вигляду, яка може бути розв'язана, наприклад, симплекс-методом. Обмеження вантажопідйомностей означає можливість такої ситуації, коли неможливо виконати доставку МТЗ з використання транспортних засобів лише одного виду.

	D_n	B_1	B_2	...	B_n	Пропозиція
A_1	d_{11}	c_{111}	c_{121}	...	c_{1n1}	a_1
	d_{12}	c_{112}	c_{122}	...	c_{1n2}	
	d_{13}	c_{113}	c_{123}	...	c_{1n3}	
A_2	d_{21}	c_{211}	c_{221}	...	c_{2n1}	a_2
	d_{22}	c_{212}	c_{222}	...	c_{2n2}	
	d_{23}	c_{213}	c_{223}	...	c_{2n3}	
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots	\vdots
A_m	d_{m1}	c_{m11}	c_{m21}	...	c_{mn1}	a_m
	d_{m2}	c_{m12}	c_{m22}	...	c_{mn2}	
	d_{m3}	c_{m13}	c_{m23}	...	c_{mn3}	
Попит		b_1	b_2	...	b_n	

Рисунок 1 – Загальний вигляд таблиці транспортних витрат

	D_n	B_1	B_2	...	B_n	Пропозиція
A_1	d_{11}	x_{111}	x_{121}	...	x_{1n1}	a_1
	d_{12}	x_{112}	x_{122}	...	x_{1n2}	
	d_{13}	x_{113}	x_{123}	...	x_{1n3}	
A_2	d_{21}	x_{211}	x_{221}	...	x_{2n1}	a_2
	d_{22}	x_{212}	x_{222}	...	x_{2n2}	
	d_{23}	x_{213}	x_{223}	...	x_{2n3}	
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots	\vdots
A_m	d_{m1}	x_{m11}	x_{m21}	...	x_{mn1}	a_m
	d_{m2}	x_{m12}	x_{m22}	...	x_{mn2}	
	d_{m3}	x_{m13}	x_{m23}	...	x_{mn3}	
Попит		b_1	b_2	...	b_n	

Рисунок 2 – Загальний вигляд таблиці розв'язку транспортної задачі

Урахування часових обмежень пропонується реалізувати за методом заборонених клітинок. Для цього введемо додаткову таблицю часу доставки (рис. 3), яка є подібною до поданої на рис. 1. Відмінностями таблиці, як й у випадку двохіндексної транспортної задачі є заміна вартостей постачання одиниці МтЗ часом доставки з пункту зберігання в пункт споживання відповідним видом транспорту, а також виключення стовпчика D_n .

Для урахування часових обмежень на перевезення вводяться граничні допустимі строки постачання необхідного обсягу МтЗ у кожний з пунктів споживання $T_j, j = \overline{1, n}$. Якщо $T_1 = T_2 = \dots = T_n = T$, тоді йдеться про вимогу виконання всіх поставок в межах загального часу T . В іншому разі обмеження на час постачання МтЗ будуть різними, залежно від потреби.

Після цього в кожному стовпчику таблиці часу доставки вантажів (рис. 3) виконуються порівняння часу t_{ijk} з часовим обмеженням T_j . Якщо $t_{ijk} > T_j$, тоді клітинка вважається забороненою і в неї замість відповідного підставляється велике число. Одночасно велике число додається також у відповідні клітинки в таблиці транспортних витрат (рис. 1). Ці клітинки стають забороненими при виконанні оптимізації за вартістю перевезень в задачі (1), (2). Їх застосування призводить до значного зростання ЦФ, що означає неможливість

задовольнити умовам перевезення з часовими обмеженнями $T_j, j = \overline{1, n}$. На відміну від методу «заборонених клітинок», описаного в [7], в такій постановці задача залишається лінійною відносно вихідної ЦФ виду (1). Логістичний показник витрат часу на перевезення МтЗ з урахуванням їх обмежень є додатковим обмеженням, яке ураховується введенням заборонених клітинок. Таке обмеження може призвести до відсутності розв'язку задачі за умови, коли не можуть бути задоволені обмеження, тобто в процесі оптимізації застосовуються дані із заборонених клітинок. В такому випадку часові обмеження потрібно пом'якшувати збільшенням значень T_j .

	B_1	B_2	...	B_n	Пропозиція
A_1	t_{111}	t_{121}	...	t_{1n1}	a_1
	t_{112}	t_{122}	...	t_{1n2}	
	t_{113}	t_{123}	...	t_{1n3}	
A_2	t_{211}	t_{221}	...	t_{2n1}	a_2
	t_{212}	t_{222}	...	t_{2n2}	
	t_{213}	t_{223}	...	t_{2n3}	
⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮
A_m	t_{m11}	t_{m21}	...	t_{mn1}	a_m
	t_{m12}	t_{m22}	...	t_{mn2}	
	t_{m13}	t_{m23}	...	t_{mn3}	
Попит	b_1	b_2	...	b_n	

Рисунок 3 – Загальний вигляд таблиці часу доставки вантажів в транспортній задачі

Розглянемо практичну реалізацію розв'язання транспортної задачі (1), (2) з додатковими логістичними обмеженнями на обсяги вантажопідйомності та строки доставки вантажів в табличному процесорі Excel. Умовні вихідні дані подані в таблицях (рис. 4 і 5), аналогічних представленим на рисунках 1 і 3. Показники вартості та часу доставки подані для трьох пунктів відправлення та трьох пунктів призначення для кожного з трьох видів транспорту (автомобільного, залізничного та річкового). Обмеження за часом доставки МтЗ T_j вводяться у три нижні клітинки таблиці в рядку T_j план (рис. 5).

Вартість перевезення 1 тони вантажу						
Пункти відправлення	Вид транспорту	Наявна вантажопідйомність	Пункти призначення			Запаси
			Миколаїв	Херсон	Одеса	
Переяслав-Хм	АВТО	120	834,00	956,00	1110,00	480
	ЗАЛІЗНИЦЯ	1035	696,96	776,45	751,10	
	РІЧКА	1800	595,23	530,18	646,91	
Кременчук	АВТО	120	636,00	758,00	946,00	420
	ЗАЛІЗНИЦЯ	1035	368,00	446,98	543,74	
	РІЧКА	1800	400,00	356,90	474,24	
Вознесеньск	АВТО	120	180,00	312,00	286,00	300
	ЗАЛІЗНИЦЯ	1035	122,11	239,62	177,41	
	РІЧКА	1800	60,80	121,60	141,06	
	100000000	Потреба	320	500	380	ТЗ ЗАКРИТА

Рисунок 4 – Таблиця умов мультимодальної транспортної задачі за вартістю доставки

В клітинку І13 на рис. 5 введено велике число (10000) для показників часу, а в клітинку К4 ввести формулу “=IF(K\$13>0;IF('Показники ділянок'!В6<=K\$13;'Показники ділянок'!В6;\$I\$13);'Показники ділянок'!В6)”.

Час доставки вантажу до пунктів призначення					
Пункти відправлення	Вид транспорту	Пункти призначення			
		Миколаїв	Херсон	Одеса	
Переяслав-Хм	АВТО	6,62	7,47	8,16	
	ЗАЛІЗНИЦЯ	13,75	16,85	15,9	
	РІЧКА	54,09	48,99	59,11	
Кременчук	АВТО	5,68	6,42	8,76	
	ЗАЛІЗНИЦЯ	6,96	9,95	10,98	
	РІЧКА	36,11	32,98	41,94	
Вознесенськ	АВТО	1,76	2,74	3,67	
	ЗАЛІЗНИЦЯ	2,94	5,94	2,96	
	РІЧКА	5,26	10	12,02	
10000	Тїплан				

Рисунок 5 – Таблиця часу доставки з можливістю введення часових обмежень

Показники ділянок, які для наочності і зручності користування вводяться на окремому аркуші, показані на рис. 6. За наявності обмеження по часу доставки в стовпчику К (Тїплан), якщо значення часу доставки в клітинці К4 не задовольняє вимогам обмежень в неї буде введено велике число (10000) (рис. 7). За цим принципом вводяться подібні формули в усі клітинки діапазону К4:М12. Значення наявної вантажопідйомності також обчислюються на окремому аркуші і залежить від наявного парку транспортних засобів різних видів в пунктах зберігання та вантажопідйомності окремих одиниць.

Показники ділянок між пунктами відправлення та призначення							
Час доставки по видах транспорту				Вартість перевезення 1 тонни вантажу по видах транспорту			
АВТО	Пункти призначення			АВТО	Пункти призначення		
	Пункти відправлення	Миколаїв	Херсон		Одеса	Миколаїв	Херсон
Переяслав-Хм	6,62	7,47	8,16	Переяслав-Хм	834,00	956,00	1 110,00
Кременчук	5,68	6,42	8,76	Кременчук	636,00	758,00	946,00
Вознесенськ	1,76	2,74	3,67	Вознесенськ	180,00	312,00	286,00
ЗАЛІЗНИЦЯ	Пункти призначення			ЗАЛІЗНИЦЯ	Пункти призначення		
	Пункти відправлення	Миколаїв	Херсон		Одеса	Миколаїв	Херсон
Переяслав-Хм	13,75	16,85	15,9	Переяслав-Хм	696,96	776,45	751,10
Кременчук	6,96	9,95	10,98	Кременчук	368,00	446,98	543,74
Вознесенськ	2,94	5,94	2,96	Вознесенськ	122,11	239,62	177,41
РІЧКА	Пункти призначення			РІЧКА	Пункти призначення		
	Пункти відправлення	Миколаїв	Херсон		Одеса	Миколаїв	Херсон
Переяслав-Хм	54,09	48,99	59,11	Переяслав-Хм	595,23	530,18	646,91
Кременчук	36,11	32,98	41,94	Кременчук	400,00	356,90	474,24
Вознесенськ	5,26	10	12,02	Вознесенськ	60,80	121,60	141,06

Рисунок 6 – Показники часу доставки та вартості перевезення між пунктами відправлення та призначення

S17						
	Н	І	Ј	К	Л	М
1	Час доставки вантажу до пунктів призначення					
2	Пункти відправлення	Вид транспорту	Пункти призначення			
3			Миколаїв	Херсон	Одеса	
4	Переяслав-Хм	АВТО	6,62	7,47	8,16	
5		ЗАЛІЗНИЦЯ	10000	10000	15,9	
6		РІЧКА	10000	10000	10000	
7	Кременчук	АВТО	5,68	6,42	8,76	
8		ЗАЛІЗНИЦЯ	6,96	10000	10,98	
9		РІЧКА	10000	10000	10000	
10	Вознесенськ	АВТО	1,76	2,74	3,67	
11		ЗАЛІЗНИЦЯ	2,94	5,94	2,96	
12		РІЧКА	5,26	10000	12,02	
13	10000	Тїплан	7	8	17	

Рисунок 7 – Заборонені клітинки в таблиці часу доставки з часовими обмеженнями

Наступним кроком зміни вводяться в таблицю умов мультимодальної транспортної задачі (рис. 4). В клітинку В13 введено велике число (100000000) для показників вартості. В клітинку D4 введено формулу “=IF(K4=\$I\$13;\$B\$13;'Показники ділянок'!G6)”, яка у разі заборони клітинки в таблиці умов розрахунку часу доставки (рис. 7) заборонятиме відповідну клітинку (виводити велике число з клітинки В13) в таблицю умов мультимодальної транспортної задачі за вартістю (рис. 4). За таким принципом вводяться формули в усі клітинки діапазону D4:F12.

Відповідні забороненим клітинкам у таблиці умов розрахунку часу доставки (рис. 7) будуть заборонені клітинки в таблиці на рис. 4 умов мультимодальної транспортної задачі, що виключатиме їх із цільової функції (рис. 8).

N15							
	А	В	С	Д	Е	Г	
1	Вартість перевезення 1 тони вантажу						
2	Пункти відправлення	Вид транспорту	Наявна вантажопідйомність	Пункти призначення			Запаси
3				Миколаїв	Херсон	Одеса	
4	Переяслав-Хм	АВТО	120	834,00	956,00	1110,00	480
5		ЗАЛІЗНИЦЯ	1035	100000000,00	100000000,00	751,10	
6		РІЧКА	1800	100000000,00	100000000,00	100000000,00	
7	Кременчук	АВТО	120	636,00	758,00	946,00	420
8		ЗАЛІЗНИЦЯ	1035	368,00	100000000,00	543,74	
9		РІЧКА	1800	100000000,00	100000000,00	100000000,00	
10	Вознесенськ	АВТО	120	180,00	312,00	286,00	300
11		ЗАЛІЗНИЦЯ	1035	122,11	239,62	177,41	
12		РІЧКА	1800	60,80	100000000,00	141,06	
13		100000000	Потреба	320	500	380	ТЗ ЗАКРИТА
14							

Рисунок 8 – Заборонені клітинки в таблиці умов мультимодальної транспортної задачі за критерієм вартості

Розрахунок цільової функції здійснюється в окремій клітинці, зазвичай нижче таблиці опорного плану перевезень. У нашому випадку в клітинку E30 треба ввести формулу “=SUMPRODUCT(D4:F12;D19:F27)” (рис. 9).

Для урахування обмежень по загальній вартості перевезень в клітинки В30 та В31 вводяться два параметри: максимальної S_{max} та мінімальної S_{min} допустимих вартостей

перевезень (рис. 9). В розглянутому прикладі в ці клітинки введено: в клітинку В30 – занадто велике значення; в клітинку В31 – нуль, що виключило вплив цих обмежень.

ПЛАН ПЕРЕВЕЗЕНЬ						
Пункти відправлення	Вид транспорту	Використана вантажопідйомність	Пункти призначення			Запаси
			Миколаїв	Херсон	Одеса	
Переяслав-Хм	АВТО	120		120		480
	ЗАЛІЗНИЦЯ	360			360	
	РІЧКА					
Кременчук	АВТО	80		80		420
	ЗАЛІЗНИЦЯ	340	320		20	
	РІЧКА					
Вознесенськ	АВТО					300
	ЗАЛІЗНИЦЯ	300		300		
		Потреба	320	500	380	
	Smax= 100000000		S =	646277,12		
	Smin= 0					

Рисунок 9 – Оптимальний план перевезень за критерієм вартості з обмеженням за часом доставки та вантажопідйомністю ТЗ

Наступним кроком необхідно ввести параметри розв’язувача табличного процесору Microsoft Excel. З цією метою на вкладці “Дані” в групі “Аналіз” застосовується команда “Розв’язувач” та розгортається діалогове вікно “Параметри розв’язувача”, в якому вводяться всі необхідні обмеження задачі (1), (2) і додаткові (5). Розв’язання задачі виконується симплекс-методом. Оптимальний план перевезень, який отримано з використанням надбудови “Пошук розв’язання” табличного процесору Microsoft Excel, представлено на рис. 9.

Введені обмеження вплинули на оптимальний розподіл обсягу перевезень за видами транспорту та збільшили вартість перевезення з 459589,76 грн до 646277,12 грн, але при цьому дотримано обмеження за часом доставки (рис. 7).

Таким чином, за допомогою надбудови “Пошук розв’язання” в табличному процесорі Microsoft Excel показано можливість здійснювати оптимальний розподіл обсягу перевезень по видах транспорту за критерієм вартості з урахуванням обмежень за трьома логістичними показниками: наявна вантажопідйомність транспортних засобів; час доставки в пункти призначення, вартість перевезення.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Запропоновано постановку та варіант розв’язання мультимодальної транспортної задачі, в якій на відміну від класичної трьохіндексної біпланарної транспортної задачі, додатково ураховуються обмеження таких логістичних показників як строки постачання; наявна вантажопідйомність транспортних засобів різних видів та загальна вартість перевезень.

На умовному прикладі підтверджено можливість проведення розрахунків з розподілу обсягу перевезень МТЗ за видами транспорту з додатковими логістичними обмеженнями симплекс-методом за допомогою надбудови “Пошук розв’язання” в табличному процесорі Microsoft Excel, як поширеному програмному середовищі. Такі розрахунки можуть виконуватись, наприклад, під час проведення операцій оперативних угруповань військ.

Подальшим напрямом досліджень є розробка методики обґрунтування раціонального варіанту розподілу обсягу перевезень за видами транспорту під час проведення операцій оперативними угрупованнями військ, яка б інтегрувалася в систему логістичного забезпечення ЗС України. Це надасть можливість обґрунтувати найефективніший за вартістю та менш

затратний варіант вибору видів транспорту в ході планування перевезення військ та транспортування військового майна з урахуванням логістичних обмежень. При цьому можуть також розглядатись варіанти доставки МтЗ кількома видами транспорту з перевантаженням вантажів на маршруті перевезення.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Настанова “Управління (комендатура) військових сполучень”. ВКДП 4-1-1(03).01. К.: Командування Сил логістики ЗС України, 2020. 48 с.
2. Романченко І. С., Хазанович О. І., Трегубенко С. С. Моделювання системи матеріально-технічного забезпечення: монографія. Львів: НАСВ ЗС України, 2015. 156 с.
3. Романченко І. С., Шуєнкін В. О., Хомчак Р. Б., Трегубенко С. С., Марко І. Ю., Закусило П. С., Хазанович О. І. Розвиток теорії матеріально-технічного забезпечення військ: монографія. Львів: НАСВ ЗС України, 2019. 650 с.
4. Гаврилюк І. Ю. Удосконалена методика розподілу транспортних засобів видів системи транспортного забезпечення оперативного угруповання військ під час операції (бойових дій). К.: ЦНДІ, 2017. 28 с.
5. Христофидес Н. Теория графов. Алгебраический подход. М.: Мир, 1978. 432 с.
6. Таха Х. Введение в исследование операций: В 2-х книгах. Кн. 1. Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 479 с.
7. Вентцель Е. С. Исследование операций. М.: “Советское радио”, 1972. 552 с.
8. Зайченко Ю. П. Исследование операций. Издательское объединение “Вища школа”, 1975. 320 с.
9. Ганненко Ю. Удосконалення часткової методики оптимізації маршруту перевезення матеріальних засобів перевезення матеріальних засобів. *Social Development and Security*. 2020. Vol. 10. No. 5. P. 128-134. <https://doi.org/10.33445/sds.2020.10.5.11>.
10. Peng Y., Yong P. and Luo Y. (2021). The route problem of multimodal transportation with timetable under uncertainty: multi-objective robust optimization model and heuristic approach. *RAIRO-Oper. Res.* 55, S3035-S3050. <https://doi.org/10.1051/ro/2020110>.
11. Ebrahimnejad A. (2015). An improved approach for solving fuzzy transportation problem with triangular fuzzy numbers. *J. Intell. Fuzzy Syst.* 29, 963-974. <https://doi.org/10.3233/IFS-151625>.
12. Ge Y., Sun Y. and Zhang C. (2024). Modeling a Multimodal Routing Problem with Flexible Time Window in a Multi-Uncertainty Environment. *Systems*. 12(6):212. <https://doi.org/10.3390/systems12060212>.
13. Раскин Л. Г., Кириченко И. О. Многоиндексные задачи линейного программирования (теория, методы, приложения). М.: Радио и связь, 1982. 240 с.
14. Zabolotnii S., Mogilei S. (2019). Optimization of the method of constructing reference plans of multimodal transport problem. *Technology audit and control systems*. 1/2 (45), 15-20. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.154561>.
15. Гончаров А. В., Могілей С. О. Реалізація мультимодальних транспортних задач в різних програмних середовищах. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2020. 25(3). С. 67-74. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.3.2020.215516>.

REFERENCES:

1. Nastanova “Upravlinnia (komendatura) viiskovykh spoluchen”. VKDP 4-1-1(03).01. K.: Komanduvannia Syl lohistyky ZS Ukrainy, 2020. 48 s.
2. Romanchenko I. S., Khazanovych O. I., Trehubenko S. S. Modeliuvannia systemy materialno-tekhnichnoho zabezpechennia: monohrafiia. Lviv: NASV ZS Ukrainy, 2015. 156 s.
3. Romanchenko I. S., Shuienkin V. O., Khomchak R. B., Trehubenko S. S., Marko I. Yu., Zakusylo P. S., Khazanovych O. I. Rozvytok teorii materialno-tekhnichnoho zabezpechennia viisk: monohrafiia. Lviv: NASV ZS Ukrainy, 2019. 650 s.
4. Havryliuk I. Yu. Udoskonalena metodyka rozpodilu transportnykh zasobiv vydiv systemy transportnoho zabezpechennia operatyvnoho uhrupuvannia viisk pid chas operatsii (boiovykh dii). K.: TsNDI, 2017. 28 s.
5. Xristofides N. Teoriya grafov. Algebraicheskij podhod. M.: Mir, 1978. 432 s.

6. Taxa X. Vvedenie v issledovanie operacij: V 2-x knigax. Kn. 1. Per. s angl. M.: Mir, 1985. 479 s.
7. Ventcel' E. S. Issledovanie operacij. M.: "Sovetskoe radio", 1972. 552 s.
8. Zajchenko Yu. P. Issledovanie operacij. Izdatel'skoe ob"edinenie "Vishha shkola", 1975. 320 s.
9. Hannenko, I. (2020). Improving the partial method of optimizing the route of the material resources transportation. *Social Development and Security*. 10(5), 128-134. <https://doi.org/10.33445/sds.2020.10.5.11>.
10. Peng Y., Yong P. and Luo Y. (2021). The route problem of multimodal transportation with timetable under uncertainty: multi-objective robust optimization model and heuristic approach. *RAIRO-Oper. Res.* 55, S3035-S3050. <https://doi.org/10.1051/ro/2020110>.
11. Ebrahimnejad A. (2015). An improved approach for solving fuzzy transportation problem with triangular fuzzy numbers. *J. Intell. Fuzzy Syst.* 29, 963-974. <https://doi.org/10.3233/IFS-151625>.
12. Ge Y., Sun Y. and Zhang C. (2024). Modeling a Multimodal Routing Problem with Flexible Time Window in a Multi-Uncertainty Environment. *Systems*. 12(6):212. <https://doi.org/10.3390/systems12060212>.
13. Raskin L. G., Kirichenko I. O. *Mnogoindeksnye zadachi linejnogo programmirovaniya (teoriya, metody, prilozheniya)*. M.: Radio i svyaz', 1982. 240 s.
14. Zabolotnii S., Mogilei S. (2019). Optimization of the method of constructing reference plans of multimodal transport problem. *Technology audit and control systems*. 1/2 (45), 15-20. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.154561>.
15. Honcharov A. V., Mogilei S. O. (2020). Implementation of multimodal transport tasks in different software environments. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*. 25(3), 67-74. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.3.2020.215516>.

**Dr. Sci. Prof. Bratchenko H.D., Ph.D. Honcharuk A.A.,
Ph.D. Abramov S.V., Duilovskiy A.O.**

SOLVING OF THE MULTIMODAL TRANSPORTATION PROBLEM TAKING INTO ACCOUNT LIMITATIONS OF LOGISTICS INDICATORS

The implementation of military transportation by all types of transport involves planning, management, deployment of transport communications, distribution and preparation of types of transport, organization of the transportation of troops and military property, evacuation of the wounded and sick, damaged weapons and military equipment, and trophy property. As a result of these actions, the issue of timely delivery of material and technical means with the lowest costs should be resolved.

The solution to the multimodal (three-index biplanar) transportation problem is presented to find the rational distribution and delivery of material and technical means. The proposed solution considers the limitations of logistics indicators, such as delivery time, the available carrying capacity of different types of vehicles, the total cost of transportation in the operational movement of storage points and consumers, changes in supply routes, and delivery vehicle types. Introducing an additional constraint into the three-index biplanar transport problem turns it into a linear programming problem of general form. The three-index transportation problem with extra logistical constraints is given a mathematical formulation. A form of input data presentation in the extended transport tables of transportation costs and time spent on cargo transportation is given. An easy way to solve this kind of problem using the simplex method is demonstrated in the Microsoft Excel spreadsheet processor "Solver" add-on.

The article presents the results of solving a multimodal transportation problem with logistical constraints in Microsoft Excel using the example of the delivery of material and technical means by three types of transport (road, rail, and river), with time and cost constraints. The example uses conditional input data for the simulation of the delivery of cargo from three Ukrainian cities (storage points) to the other three (consumption points).

Keywords: military logistics, multimodal transportation problem, simplex method, objective function, constraints, transportation plan.