

## **12 ОПТИМІЗАЦІЯ ТРАНСПОРТНИХ ВИТРАТ ПРИ ЛІКВІДАЦІЇ ПРОСТОРОВО-РОЗПОДІЛЕНОЇ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ**

*І.А. Чуб, Р.В. Гудак, Ю.М. Михайловська*

### **12.1 Планування ресурсного забезпечення ліквідації надзвичайної ситуації**

Міське господарство – це складна соціально-економічна та організаційно-технічна система. Ефективність функціонування цієї системи залежить не тільки від якості розв’язання повсякденних задач господарювання, тобто діяльності міських управлінських структур в сталому режимі, але і від здатності генерувати адекватну професійну реакцію на надзвичайну ситуацію (НС) техногенного або природного характеру, час і місце настання та ступінь важкості якої заздалегідь невідомі. Провідну роль в процесі реалізації операцій ліквідації наслідків НС відіграють територіальні підрозділи державної служби з надзвичайних ситуацій України [1]. Під час НС територіальна громада зазнає серйозної небезпеки, повноцінне функціонування соціальної та інженерної інфраструктур порушується, тому чітка організація процесу ліквідації НС, що загалом відбувається в умовах жорсткої обмеженості ресурсного забезпечення, є однією з найважливіших характеристик рівня життєздатності міського господарства.

Найбільш розповсюдженими у світі є гідрологічні надзвичайні ситуації природного характеру, такі як повені, підтоплення, прориви дамб тощо. Гідрологічні ПНС торкаються великої кількості людей, особливо це стосується соціально і економічно незахищених верств населення міст і населених пунктів у густонаселених регіонах.

Так, середньорічні втрати від повені в країнах Європейського Союзу,

оцінені в 4,9 мільярда євро на рік за період 2000-2012 р.р.. Прогнозується, що ці втрати потенційно можуть збільшитися до 23,5 мільярда євро до 2050 року [2].

Характерною ознакою гідрологічної ПНС є її просторова розподіленість. Іншими словами, даний тип НС природного характеру вражає великі за площею території, на яких розміщено декілька населених пунктів, міст національного та регіонального підпорядкування.

Проблема прийняття оптимальних рішень та планування рятувальних операцій під час ліквідації НС техногенного або природного характеру, безумовно, носить міжнаціональний характер, тому в останні десятиріччя швидко розвивається така галузь науки як гуманітарна логістика. Логістика є найважливішим елементом процесу ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій і катастроф, і найдорожчою його частиною, оскільки вона складає близько 80% від загальних витрат на допомогу при НС техногенного та природного характеру [3].

Як зазначається в [4], в науковій літературі існують різні визначення поняття «гуманітарна логістика», можливо найбільш точним є уфсneyт визначення, надане на Конференції з гуманітарної логістики 2004 р. дослідниками Fritz Institute.

**Визначення 12.1.** Гуманітарна логістика – це процес планування, впровадження та контролю над ефективними, економічно вигідними процедурами транспортування і зберігання товарів і матеріалів, а також пов'язаної з ними інформації, від точки походження до точки споживання з метою задоволення вимоги кінцевого бенефіціара та полегшення страждань людей в зоні ураження. Цей процес охоплює низку заходів, включаючи підготовку, планування, закупівлю, транспортування, зберігання, історію та митний контроль.

Предметну галузь гуманітарної логістики характеризують такі невід'ємні властивості:

- непередбачуваний попит щодо термінів постачання, географічного положення кінцевих споживачів, видів товарів, необхідної кількості

товарів;

- короткий час проведення та раптовість попиту на велику кількість найрізноманітнішу продукцію та послуги;
- відсутність початкових ресурсів з точки зору постачання, людських ресурсів, технологій, потужностей та фінансування.
- відсутність достатньої транспортної інфраструктури, складні погодні умови.

При цьому основна відмінність між бізнес-логістикою [5] або військовою логістикою та гуманітарною логістикою базується на кінцевій меті останньої – полегшити стан людей в зоні ураження.

Реалізація цієї мети перш за все передбачає мінімізацію часу доставки вантажів із продуктами життєзабезпечення та часу евакуації постраждалого населення.

Виходячи з цього положення одним з найбільш перспективних транспортних засобів при ліквідації наслідків НС природного або техногенного характеру є гелікоптери.

Парк гелікоптерів ДСНС України, що використовується у співдружності із Національною гвардією України в рамках створення Єдиної системи авіаційної безпеки останнім часом значно розширився. Основу його складають гвинтокрили Мі-8 (рис. 12.1).

Ці транспортні засоби призначені для перевезення до 8 пасажирів. Передбачена можливість різних варіантів використання – медичний, аварійно-рятувальний, патрульний. Базовий варіант дозволяє виконувати покладені на нього обов'язки вдень і вночі в простих і складних метеорологічних умовах, з аеродромів і непідготовлених майданчиків.

У медичному варіанті гвинтокрили Мі-8 можуть використовуватися як санітарні та перевозити 3-6 поранених на ношах або 15 сидячих пацієнтів на відстань до 725 км. Крім того, передбачена установка реанімаційного устаткування.



Рисунок 12.1 – Гвинтокрил Мі-8

Мі-8 використовуються як пожежні або транспорт для перевезення вантажів у вантажній кабіні і на зовнішній підвісці загальною масою до 3000 кг.

На цей час в Україні експлуатується до 70 гвинтокрилів Мі-8 та модифікацій базової моделі.

За останні роки парк гвинтокрилів на службі у ДСНС України значно розширився.

У грудні 2018 р. в рамках Єдиної системи авіаційної безпеки та цивільного захисту МВС, в Україну прибули перші два гелікоптери Airbus H-225 Super Puma (рис. 12.2) виробництва Франції.

Велика надійність даної моделі гелікоптера і радіус дії більше ніж 1000 км дають можливість забезпечувати рятувальні роботи в гірській місцевості. Загалом до кінця 2021 року за підписаним із французькою стороною контрактом Державна служба надзвичайних ситуацій України та Національна гвардія України одержать 55 таких транспортних засобів.

Ще одним транспортним засобом є гвинтокрил Eurocopter EC145 (Рис. 12.3).



Рисунок 12.2 – Гелікоптер Airbus H-225 Super Puma



Рисунок 12.3 – Гелікоптер Eurocopter EC 145

Eurocopter EC 145 – це багатоцільовий вертоліт, створений франко-німецьким концерном «Eurocopter». Ця модель є однією з найбільш популярних в середньому класі. Eurocopter EC 145 є модернізованою версією

багатофункціонального вертольоту ВК-117. При модифікації Eurocopter EC 145 отримав несучий гвинт з оптимізованим профілем і оновлене радіоелектронне обладнання, а також помітно збільшену пасажирську кабіну. Вертоліт випускається в різних версіях з комплектаціями, орієнтованими на виконання широкого спектру завдань, у тому для виконання медичних і рятувальних операцій. Низький рівень шуму дозволяє використовувати вертоліт в міських умовах.

Основні льотно-технічні характеристики гвинтокрилів, що є у розпорядженні ДСНС України, за матеріалами [6 – 8] наведені в таблиці 12.1.

Таблиця 12.1 – Основні льотно-технічні характеристики гвинтокрилів ДСНС України

Опис характеристик	Мі-8 (з модифікаціями)	Гелікоптер Airbus H-225 Super Puma	Eurocopter EC 145
Рік побудови	1965	2000	1982
Екіпаж	3 особи	2 пілоти, 1 стюард	1 - 2 пілоти
Пасажиромісткість	28 осіб	до 24 осіб	до 9 осіб
Довжина (з рульовим гвинтом, що обертається), м	25,31	19,5	13,03
Висота (з рульовим гвинтом, що обертається), м	5,54	4,97	3,96
Діаметр несучого гвинта, м	21,3	16,2	11,0
Маса порожнього, кг	7000	5456	1792

Корисне навантаження, кг		5555	1793
Максимальна злітна маса, кг:	12 000	11 200	3585
Двигуни	2 × ТВ2-117	2 × Turbomeca Makila 2A1	2 × Turbomeca Arriel 1E2 738 кс
Потужність двигунів	2 × 1500 л. с.	2 × 2 101 л.с. (2 × 1 567 кВт)	550 кВт
Крейсерська швидкість		296	246
Максимальна швидкість, км/год	250	315	278
Динамічний потолок, м	4200	5530	5485
Практична дальність, км	425	1450	705
Перегінна дальність, км	додаткові паливні баки – 1300 при максимальному навантаженні – 550	1852	680
Витрати авіапалива, т/год	0,72		0,244
Вантажний відсік		об'єм : 15 м <sup>3</sup> довжина: 7,87 м ширина: 1,8 м • висота: 1,45 м	об'єм : 0,8 м <sup>3</sup> довжина: 3,42 м ширина: 1,4 м висота: 1,22 м

Задача визначення оптимального за часовим та вартісним критеріями плану доставки вантажів із продуктами життєзабезпечення та евакуації постраждалого населення останні десятиріччя є предметом пильної уваги науковців. З'явилась ціла низка наукових публікацій, в яких проводиться аналіз можливих підходів до формалізації та розв'язання даної загальної задачі за різних припущень. У цьому зв'язку необхідно згадати огляд [9].

В цій роботі розглянуті як оптимізаційні, так і імітаційні математичні моделі, методи їх розв'язання та відповідні інформаційні технології, що застосовуються в гуманітарній логістиці. Дані інструментальні засоби класифіковано з точки зору структури представлення транспортних засобів / мережі та їх функціональності. Обговорюються взаємозв'язки між цими характеристиками та вимірністю моделі. У цьому огляді також обстежуються програми інформаційних систем у гуманітарній логістиці, оскільки моделі гуманітарної логістики та їх рішення повинні бути інтегровані з інформаційними технологіями, щоб забезпечити їхнє використання на практиці.

Аналіз множини публікацій, посилення на які містить даний огляд, показує, що значно меншу кількість наукових робіт присвячено застосуванню в якості транспортних засобів такого виду транспорту як гелікоптери.

В цьому контексті також активно розглядається так звана проблема «останньої мілі» [10].

Проблема останньої мілі – це кінцевий етап гуманітарної операції щодо ліквідації наслідків НС, що включає доставку вантажів та гуманітарної допомоги від мобільних центрів допомоги [11].

Місії вертольотів – це дорогі засоби ліквідації надзвичайної ситуації, наприклад, вартість польоту важкого вантажопідйомного вертольота може знаходитися в діапазоні від 2000 до 3000 доларів на годину. В дослідженні [12] розглянуто проблему «останньої мілі» транспортного ланцюга поставок автомобілів за запитом Міжнародної Федерації Червоного Хреста та Товариства Червоного півмісяця (IFRC) та встановлено, що застосування процедур мінімізації кількості флоту гелікоптерів та оптимізації маршрутів цих



транспортних засобів з метою ліквідації наслідків стихійних лих може зменшити кількість необхідних транспортних засобів приблизно на 15%.

В роботі [13] концепцію проблеми «останньої мілі» розширено також на операції евакуації постраждалого населення. В статті описаний підхід до побудови системи планування координації вертольотів операції з ліквідації наслідків катастроф. Ця система може бути використана як інструмент для моделювання в в періоді попередження (територіальна система цивільного захисту працює у повсякденному режимі) на випадок надзвичайних ситуацій для кращої готовності до катастроф та допомагає створювати плани ліквідації на основі оціночних даних. Система планування містить математичну модель та процедуру управління маршрутами (Route Management Procedure – RMP), що опрацьовує вихідні дані моделі.

Система включає також операції з вертольотами, які передбачають розподіл так званої «останньої мілі» (last mile distribution) и для медичної допомоги постраждалим та евакуації поранених. Доставка таких предметів як ліки, вакцини, кров, тощо до уражених місць та евакуація поранених особи з цих місць складають транспортні завдання, які повинні виконувати вертольоти. Запропонована система моделювання враховує особливі авіаційні обмеження вертольотів. Мета системи полягає у зведенні до мінімуму загального часу місії, необхідного для завершення перевезення завдання. RMP дозволяє Виробнику рішень (DM) визначати або місію час закінчення, або кількість транспортних засобів, доступних для місії. Враховуючи обмеження, накладені DM, RMP генерує можливий розподіл маршрутів вертольотів і палива, які виконуються протягом визначеного часу виконання місії. Підхід, що розглядається, апробовано на даних пошкоджень після землетрусу, наданих Координаційним Центром з надзвичайних ситуацій Стамбула. За постановкою ця задача є однокритеріальною, лінійною, детермінованою. Вважається, що кількість ураженого населення оцінюється величиною 10000 осіб.

В ґрунтовній роботі [14] запропоновано математичну модель дискретної оптимізації планування місії гелікоптерів на етапі ліквідації надзвичайної

ситуації. Складність параметричної ідентифікації даної моделі визначає необхідність її декомпозиції поетапного застосування.

Оптимізаційні математичні моделі, наведені вище, належать до класу детермінованих моделей. Тим не менш, на зміст та форми процесів гуманітарної логістики значно впливає невизначеність в надзвичайних сценаріях. Невизначеність полягає у запиті на надання допомоги (попит на гуманітарну логістику), ресурсах та обладнанні, що надаються державними та приватними суб'єктами, невизначеність в умовах функціонування транспортної мережі.

З цією метою як оптимізаційний, так і імітаційний підходи мають опрацьовувати невизначеність логістики надзвичайних ситуацій [15]. Як теоретичний фундамент для подолання невизначеності в оптимізації використовуються ідеологія нечітких систем та робастна оптимізація [16].

Таким чином, задача гуманітарної логістики, тобто задача транспортування вантажів та предметів першої необхідності у зону ураження, а також евакуація потерпілих є складною, багатовимірною в загальному випадку багатокритеріальною задачею гуманітарної логістики, з додатковими обмеженнями (наприклад, пріоритети часу обслуговування), що обумовлює необхідність моделювання СГЛ із урахуванням можливості зміни часу виконання замовлень з метою:

- зменшення часу доставки вантажів
- зменшення часу доставки предметів першої необхідності,
- зменшення часу евакуації
- зменшення витрат на утримання транспортних засобів шляхом мінімізації їх кількості;
- зменшення витрат на слідування до місць знаходження потерпілих (**поселень**) в зоні надзвичайної ситуації шляхом оптимізації транспортних маршрутів;
- зменшення холостого пробігу транспортних засобів.

В гуманітарній логістиці активно використовуються математичні моделі і оптимізаційні методи транспортної логістики. Класичною в даному сенсі є

публікація Г.Данцига [17], яка, можливо, є першою даному науковому напрямі.

Загалом задачі побудови оптимальних маршрутів різноманітних розглядались у численних наукових публікаціях вітчизняних та закордонних авторів.

Виділимо роботу [18], яку присвячено задачам оперативного планування перевезень та розподілу вантажів. В дослідженні [19] запропоновано багатокритеріальну задачу підвищення ефективності управління перевезенням вантажів у динамічній транспортній мережі за рахунок складання попереднього плану перевезень.

В роботах [20-23] розглянуті задачі маршрутизації транспортних засобів. В роботі [20] досліджується транспортна модель з обмеженою кількістю транспортних засобів (ТЗ), в публікації [22] розглянуто наближений метод розв'язання кластерної задачі маршрутизації.

Слід зазначити, що задачі, які передбачають не тільки доставку гуманітарних вантажів, але і евакуацію постраждалих із зони надзвичайної ситуації, є вкрай малодослідженими. Крім того, в більшості досліджень розглядаються задачі оперативного планування [24-25], а задачам з необхідністю використання горизонту планування приділяється недостатня увага.

В публікації [26] розглядається транспортно-логістична система обслуговування замовлень з організацією доставки та вивезення інструментів. Пропонується динамічна модель виконання портфелю замовлень на визначеному горизонті планування з мінімізацією транспортних витрат та з урахуванням невизначеності термінів доставки.

## **12.2 Опис системи гуманітарної логістики**

Розглянемо побудову оптимізаційної динамічної моделі системи гуманітарної логістики (СГЛ) з урахуванням пріоритетності виконання замовлень у часі.

Розглянемо СГЛ як цілеспрямовану систему  $\Lambda$ , яка є об'єктом управління територіального підрозділу ДСНС України та містить множину різнорідних елементів  $M$ , на якій реалізовано множину зв'язків  $R$ , що упорядковують елементи в структуру вигляду

$$\Lambda = \langle (M \times R) \times P \rangle, \quad (12.1)$$

де  $P$  – множина властивостей структури  $(M \times R)$ , що дають змогу досягти заданої цілі [27].

В системі, що розглядається, множина елементів  $M$  містить підмножину сховищ (місць зберігання гуманітарних вантажів)  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_L\}$ , множину  $\wp = \{\wp_1, \dots, \wp_N\}$  місць доставки вантажів та предметів першої необхідності, а також перебування постраждалих від надзвичайної ситуації, множину місць евакуації  $E = \{E_1, E_2, \dots, E_U\}$ , множину місць заправки  $F = \{F_1, F_2, \dots, F_Y\}$  та множину транспортних засобів (ТЗ)  $V$ .

Як визначено раніше, в якості множини транспортних засобів

$$V = (V_{11}, \dots, V_{1N_1}, V_{21}, \dots, V_{2N_2}, V_{31}, \dots, V_{3N_3}) \quad (12.2)$$

розглядаються гелікоптери Mi-8, Airbus H-225 Super Puma, Eurocopter EC145.

Зауваження 12.1 В залежності від локації реалізації гідрологічної ПНС, ступеню її важкості, пори року та інших характеристик кількість та сутність елементів множин  $M$ ,  $R$ ,  $P$  можуть змінюватися.

В даному дослідженні розглядається просторово-розподілена гідрологічна ПНС. Тому у загальному випадку множина  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_L\}$  може мати більш ніж один елемент, локації сховищ  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_L\}$  гуманітарних вантажів та місць евакуації  $E = \{E_1, E_2, \dots, E_U\}$  можуть відрізнятися.

Розглянемо наступну постановку задачі мінімізації часу ліквідації наслідків гідрологічної ПНС.

**Постановка 1.** Множина  $C$  містить один елемент:  $L=1$  (рис. 12.4).

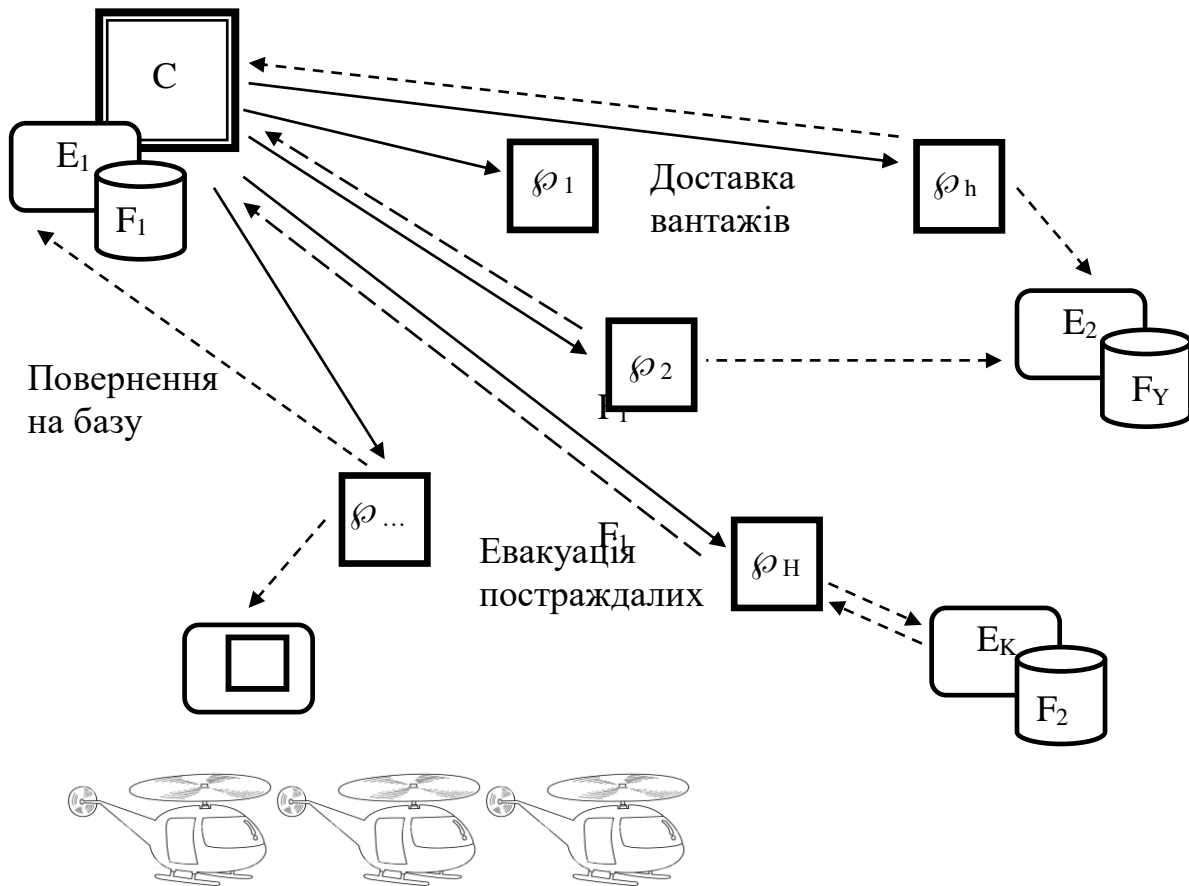


Рисунок 12.4 – Елементи системи гуманітарної логістики

Позначимо координати розміщення  $C$  через  $(x_0, y_0)$ . Склад  $C$  містить упорядковану множину  $S = (S_1, S_2, \dots, S_N)$  вантажів, медикаментів, тощо, які потрібно доставити у зону  $HC$ .

Кожен з типів вантажів визначається параметрами:

$$S_n = (q_n, w_n, v_n), \quad n = 1, \dots, N,$$

де  $q_n$  – доступна кількість вантажу  $n$ -го типу,  $w_n$  – вага одиниці вантажу  $n$ -го типу,  $v_n$  – обсяг одиниці вантажу  $n$ -го типу.

Для використання у подальшому введемо додаткові змінні:

$$Q = \sum_{n=1}^N q_n, Q^n = \sum_{\eta=1}^{n-1} q_{\eta}.$$

Позначимо через  $(x_h, y_h)$  координати розміщення елемента  $\wp_h, h=1,2,\dots,N$ , множини місць доставки вантажів та предметів першої необхідності.

**Визначення 12.1.** Горизонтом планування  $[1, T]$  будемо називати інтервал часу на якому планується виконання операцій з ліквідації гідрологічної ПНС.

Потреба у вантажах та предметах першої необхідності в локаціях  $\wp_h$  визначається кортежем:

$$D_k^S = (i_k^S, h_k^S, t_{\min k}^S, t_{\max k}^S, \lambda_k^S, q_k^S), k = 1, \dots, K_S, \quad (12.3)$$

де  $k$  – номер замовлення,  $i_k^S = 1, \dots, N$  – тип вантажу,  $h_k^S = 1, \dots, N$  – номер локації  $\wp_h$  доставки вантажів, узгоджений із конкретною потребою  $k$ ,  $[t_{\min k} \dots t_{\max k}]$  – період виконання доставки,  $\lambda_k$  – пріоритетність доставки,  $q_k^S$  – кількість одиниць вантажу типу  $i_k^S$ .

Аналогічним чином надамо опис процесу евакуації постраждалих із зони наслідків гідрологічної ПНС.

Класифікуємо потребу  $G$  у евакуації постраждалих в локаціях  $\wp_h, h=1,2,\dots,N$ , наступним чином:

$$G = G_1 \cup G_2,$$

де  $G_1$  – множина постраждалих, що потребує невідкладної медичної допомоги (тип  $i_k^G = 1$ ),

$G_2$  – умовно здорові люди, що залишились в місцях, непридатних до довготривалого перебування (тип  $i_k^G = 2$ ).

Таким чином, потреба  $G$  у евакуації визначається кортежем:

$$D_k^G = (i_k^G, h_k^G, t_{\min k}^G, t_{\max k}^G, \beta_k^G, q_k^G), k=1, \dots, K_G, \quad (12.4)$$

де  $k$  – номер замовлення,  $h_k^S$  – номер локації  $\wp_h$  до евакуації, узгоджений із конкретною потребою  $k$ ,  $[t_{\min k}^G, t_{\max k}^G]$  – період виконання доставки,  $\beta_k^G$  – пріоритетність доставки,  $q_k^G$  – кількість осіб до евакуації типу  $i_k^G$ .

Кортежі  $D = (D_1, D_2, \dots, D_{K_S})$  та  $G = (G_1, G_2, \dots, G_{K_G})$  утворюють множину зв'язків СГМ в описі (12.1).

Таким чином, задача планування роботи СГМЛ на період  $[1, T]$  включає виконання  $K$  замовлень щодо потреби у вантажах та предметах першої необхідності та евакуації із зони гідрологічної ПНС.

**Зауваження 12.1.** Вважатимемо час завантаження та розвантаження гелікоптеру достатньо малим та надалі ці часові витрати не враховуватимемо.

Проведемо формалізацію характеристик елементів трьох типів множини  $V$  (12.2) у вигляді кортежу

$$V_j = (VW_j, VV_j, VP_j, VD_j, VC_j, VF_j), j=1, \dots, N_\mu, \mu=1, \dots, 3, \quad (12.5)$$

де  $VW_j$  – вантажопідйомність,  $VV_j$  – максимальний обсяг вантажу,  $VP_j$  – максимальна пасажиромісткість (з урахуванням медперсоналу),  $VD_j$  – максимальний добовий пробіг,  $VC_j$  – вартість використання  $V_j$  за період  $[1, T]$ ,  $VF_j$  – витрати авіапалива.

Зауваження 12.1 Вважатимемо множину  $V$  упорядкованою за спаданням значення вантажопідйомності  $VW_j$ , (пасажиромісткості  $VP_j$ ),  $j=1, \dots, N_\mu$ ,  $\mu=1, \dots, 3$ .

Вважатимемо, що авіапалива вистачить для здійснення будь-якого перельоту від однієї локації – місця заправки – до іншої:  $F_i, F_j \in \{F_1, F_2, \dots, F_Y\}$ .





Рейс є припустимим, якщо загальна вага вантажу, що перевозиться, не перевищує вантажопідйомність  $VW_j$  та пасажиромісткість  $VO_j$ . При цьому вважатимемо, що кожен рейс містить тільки одно відвідування  $E_u$  щодо евакуації потерпілих.

**Визначення 12.3.** Маршрутом  $\psi_{jt}$  назвемо сукупність рейсів  $V_j$ , які виконуються протягом одного дня  $t$ .

Визначимо маршрут  $\psi_{jt}$  як припустимий, якщо цей маршрут складається з припустимих рейсів, та їх сумарна протяжність не перевищує максимальне добове навантаження транспортного засобу  $WD_j$ .

Таким чином, задача планування операцій з ліквідації наслідків ПНС на період  $[1, T]$  включає виконання замовлень на доставку гуманітарної допомоги та евакуації постраждалих.

### 12.3 Властивості постановки задачі

Визначимо наступні властивості постановки задачі, що розглядається.

**Властивість 1.** Кожна локація  $\wp_h$  генерує одне або декілька замовлень  $D_k^S, k \in 1, \dots, K_S$ , вигляду (12.3). Замовлення містить вантажі різних типів. У разі розвитку ПНС замовлення від локації  $\wp_h$  можуть повторюватись.

**Властивість 2.** Момент  $t_k$  початку виконання певного замовлення  $D_k^S, k \in 1, \dots, K_S$ , залежить від пріоритету замовлення і має виконуватись в інтервалі  $[t_{\min k}, t_{\max k} - d_k + 1]$ .

Згідно властивості 2 існує  $(t_{\max k} - d_k - t_{\min k} + 1)$  варіантів виконання замовлення  $D_k^S$  (рис. 12.6).

**Властивість 3.** Вважаємо, що місткість складу є задовільною для виконання всіх замовлень локацій зони ПНС.

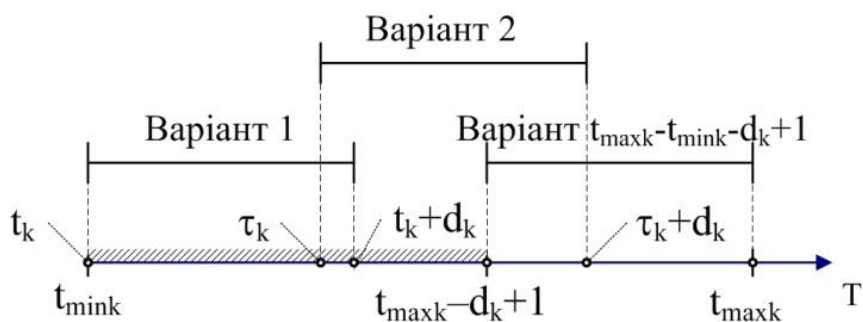


Рисунок 12.6 – Приклади варіантів виконання замовлення  $D_k^S$

Зважаючи на введені визначення та виділені властивості змістовної постановки задачі побудуємо загальну динамічну модель оптимізації транспортних витрат при плануванні операцій з ліквідації наслідків ПНС.

#### 12.4 Динамічна модель оптимізації транспортних витрат системи гуманітарної логістики

Характеристики та властивості СГЛ, наведені вище, є фундаментом постановки задачі мінімізації транспортних витрат СГЛ.

Припустим є рішення, при якому кожний рейс засобу  $V_j$  виконує тільки одну операцію евакуації постраждалих, а доставка вантажів може бути мультиплікативною. При цьому доставка вантажів в одну локацію  $\wp_h$  у разі перевищення вантажопідйомності певного транспортного засобу  $V_j$  може виконуватися декількома ТЗ, верхню оцінку кількості яких можна визначити як

$$J_h = \min \left\{ \text{round} \left( \frac{\sum_{k=1}^{K_S} q_k^S \times w_k}{V W_1} \right), \text{round} \left( \frac{\sum_{k=1}^{K_S} q_k^S \times v_k}{V V_1} \right) \right\}$$

де  $\text{round}$  – округлення вгору до найближчого цілого числа.

Тоді верхня оцінка  $J_{\max}$  кількості  $J$  необхідних ТЗ дорівнює

$$J_{\max} = \frac{\sum_{h=1}^H J_h \times 2\zeta_{0h}}{VD_j}.$$

Якщо  $J_{\max} \leq \sum_{\mu=1}^3 N_{\mu}$ , операція з ліквідації наслідків ПНС може бути

здійснена власними силами територіального підрозділу ДСНС України.

**Ендогенні змінні моделі.** Введемо булеві змінні:

$$\beta_{jt} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } V_j \text{ використовується у день } t \\ 0, \text{ інакше,} \end{cases} \quad , j = 1, \dots, J_{t\_max},$$

де  $J_{t\_max}$  – максимальна щоденна кількість гелікоптерів,

$$\mu_{jt} = \begin{cases} 1, \text{ якщо рейс } l \text{ використовується у день } t \\ 0, \text{ інакше,} \end{cases} \quad , l = 1, \dots, L, t = 1, \dots, T,$$

$$x_{ug}^1 = \begin{cases} 1, \text{ якщо ребро } \zeta_{ug} \text{ входить у рейс } l \\ 0, \text{ інакше,} \end{cases} \quad , l = 1, \dots, L, u, g = 0, \dots, H, u \neq g.$$

Розглянемо замовлення  $D_k^G$ ,  $D_k^S$  як прямокутники розмірів  $(d_k^G, g_k^G)$ ,  $(d_k^S, g_k^S)$  відповідно. При цьому параметр  $d_k^G$  – час операції евакуації,  $g_k^G$  – оцінка кількості осіб, що підлягають евакуації,  $d_k^S$  – час доставки вантажів та повернення ТЗ на базу,  $g_k^S$  – характеристика вантажу (вантажопідйомність або об'єм). Використовуючи підхід [28], введемо також у розгляд простори ресурсів TOVP (TOVW) з прямокутною системою координат, в якій горизонтальна вісь OT відповідає горизонту планування [1, T], а вертикальна вісь OVP (OVW) відбиває інформацію про кількість застосованих ТЗ (рис. 12.7).

Висота кожної горизонтальної смуги простору ресурсів відповідає характеристиці пасажиромісткості  $VP_j$  (вантажопідйомності  $VW_j$  або максимального обсягу вантажу  $VV_j$ ) транспортного засобу, що застосовується.

Розміщення замовлення  $D_k^\ell, \ell \in \{G, S\}$  у просторі ресурсів (рис. 12.7а) задають параметри розміщення  $(t_k^\ell, r_k^\ell)$  – координати нижнього лівого кута прямокутника  $D_k^\ell, \ell \in \{G, S\}$  у відповідній смугі ресурсів простору TOQ.

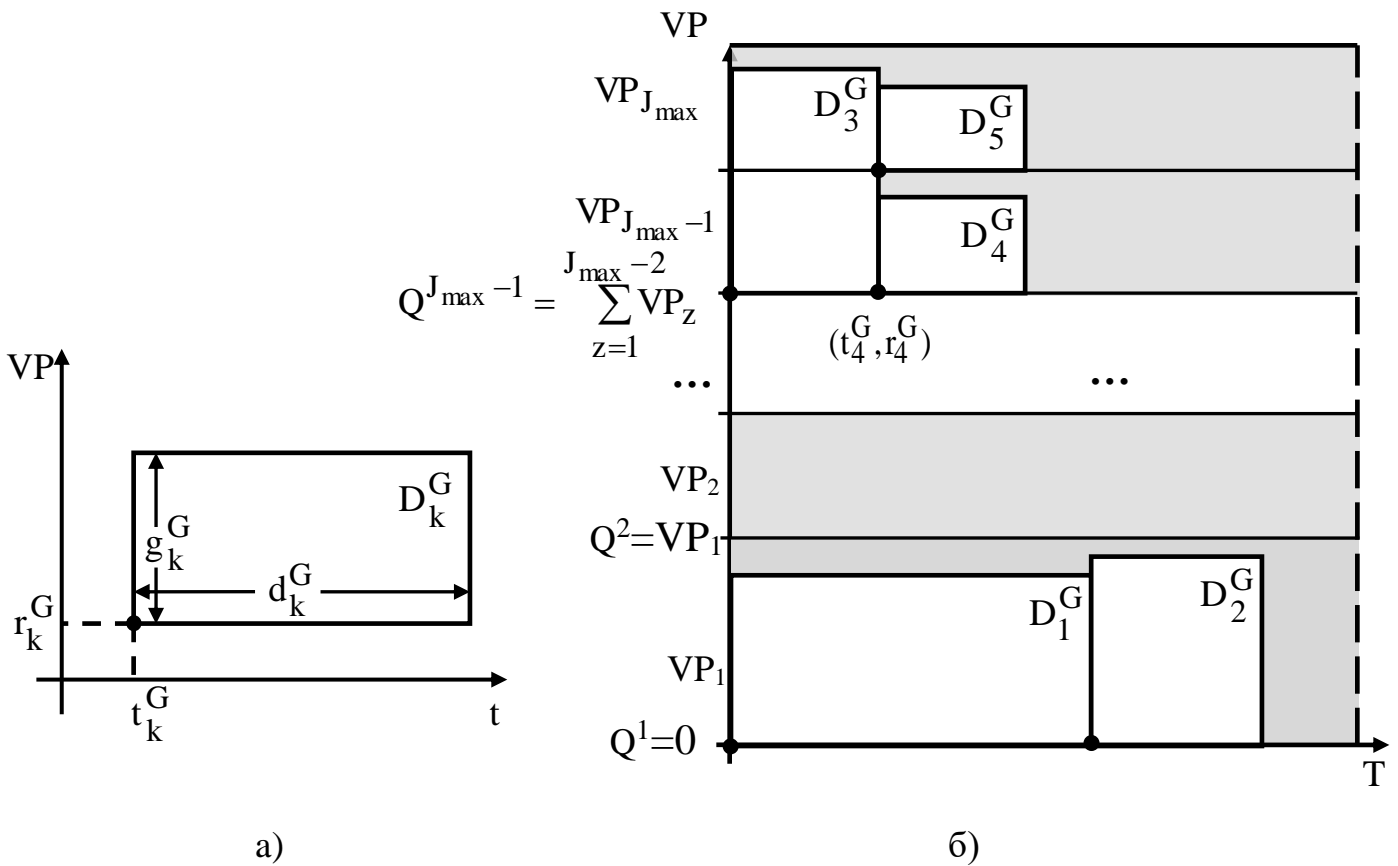


Рисунок 12.7 – Розміщення замовлень у просторі ресурсів TOVP:

а) геометричне подання замовлення  $D_k^G$ ,

б) розміщення замовлень у просторі TOVP

Відмітимо, що ендогенні змінні  $r_k^\ell$  є цілочисельними величинами, заданими у визначених діапазонах, тоді як часові параметри  $t_k^\ell$  вважатимемо неперервними змінними.

**Цільовий функціонал** задачі мінімізації транспортних витрат СГЛ є векторним:

$$(f_1, f_2), \quad (12.7)$$

де функція  $f_1(\beta_{jt})$  має вигляд:

$$f_1(\beta_{jt}) = \max_{t=1, \dots, T} \sum_{j=1}^{J_{\max}} \beta_{jt},$$

О

визначає кількість задіяних у ліквідації наслідків ПНС гелікоптерів, множина яких розподілена за часом операції, та має збігатися до мінімуму:

$$f_1(\beta_{jt}) \rightarrow \min.$$

Функціонал

$$f_2 = \{f_{21}, f_{22}, \dots, f_{2T}\},$$

де частковий критерій  $f_{2t}$  має вигляд

$$f_{2t} = \sum_{l=1}^L \left( \mu_{lt} \times \left( \sum_{u=0}^H \sum_{g=0}^H s_{ug} \times x_{ug}^l \right) \right) \rightarrow \min,$$

відповідає побудові припустимих щоденних маршрутів мінімальної довжини, які забезпечують виконання передбачених операцій з евакуації та доставки вантажів.

**Основні обмеження моделі.**

Пасажиромісткість  $VP_j$  та вантажопідйомність  $VW_j$  кожного транспортного засобу є обмеженими. Зважаючи на геометричне подання ресурсних параметрів операцій з ліквідації ПНС (рис. 12.7), відповідні обмеження на навантаження гелікоптерів задаються виразами:

$$\begin{cases} r_k^G \geq Q^{i-1} \\ -r_k^G \geq -Q^{i-1+J_k^G} \end{cases} \quad \text{та} \quad \begin{cases} r_k^S \geq Q^{i-1} \\ -r_k^S \geq -Q^{i-1+J_k^S}, k=1, \dots, K, i=1, \dots, (J_{\max} - J), \end{cases} \quad (12.8)$$

де  $J_k^S, J_k^G$  – кількість задіяних для виконання  $k$ -го замовлення гелікоптерів.

Термін виконання кожного замовлення обмежений:

$$\begin{cases} t_k^\ell \geq t_{\min k} \\ -t_k^\ell \geq -t_{\max k} + d_k - 1, k=1, \dots, K. \end{cases} \quad (12.9)$$

Жодна пара замовлень не може одночасно використовувати один і той же транспортний засіб:

$$\begin{cases} r_m^\ell - r_k^\ell \geq q_k^\ell \\ r_k^\ell - r_m^\ell \geq q_m^\ell, k, m=1, \dots, K, \ell \in \{S, G\}. \\ t_k - t_m \geq d_m \\ t_m - t_k \geq d_k \end{cases} \quad (12.10)$$

Максимальна довжина маршруту транспортного засобу обмежена:

$$\mu_t \times \sum_{l=1}^L \sum_{u=0}^H \sum_{g=0}^H s_{ug} \times x_{ug}^l \leq AD_j, \forall t=1, \dots, T, \forall j=1, \dots, J_{\max}. \quad (12.11)$$

У кожному рейсі кількість ребер, що входить у вершину графа  $\aleph = (\tilde{h}, \tilde{\lambda})$ , дорівнює кількості ребер, які виходять з неї:

$$\sum_{g=0}^H x_{ug}^l = \sum_{g=0}^H x_{gu}^l, u=0, \dots, H, l=1, \dots, K. \quad (12.12)$$

В кожний рейс завжди входить склад:

$$\sum_{g=0}^H x_{og}^l = 1, u=0, \dots, H, l=1, \dots, K. \quad (12.13)$$

Задача (12.7 – 12.13) є багатокритеріальною та NP-складною, для розв'язання якої пропонується побудувати ієрархію чотирьох взаємозалежних задач (рис. 12.8):

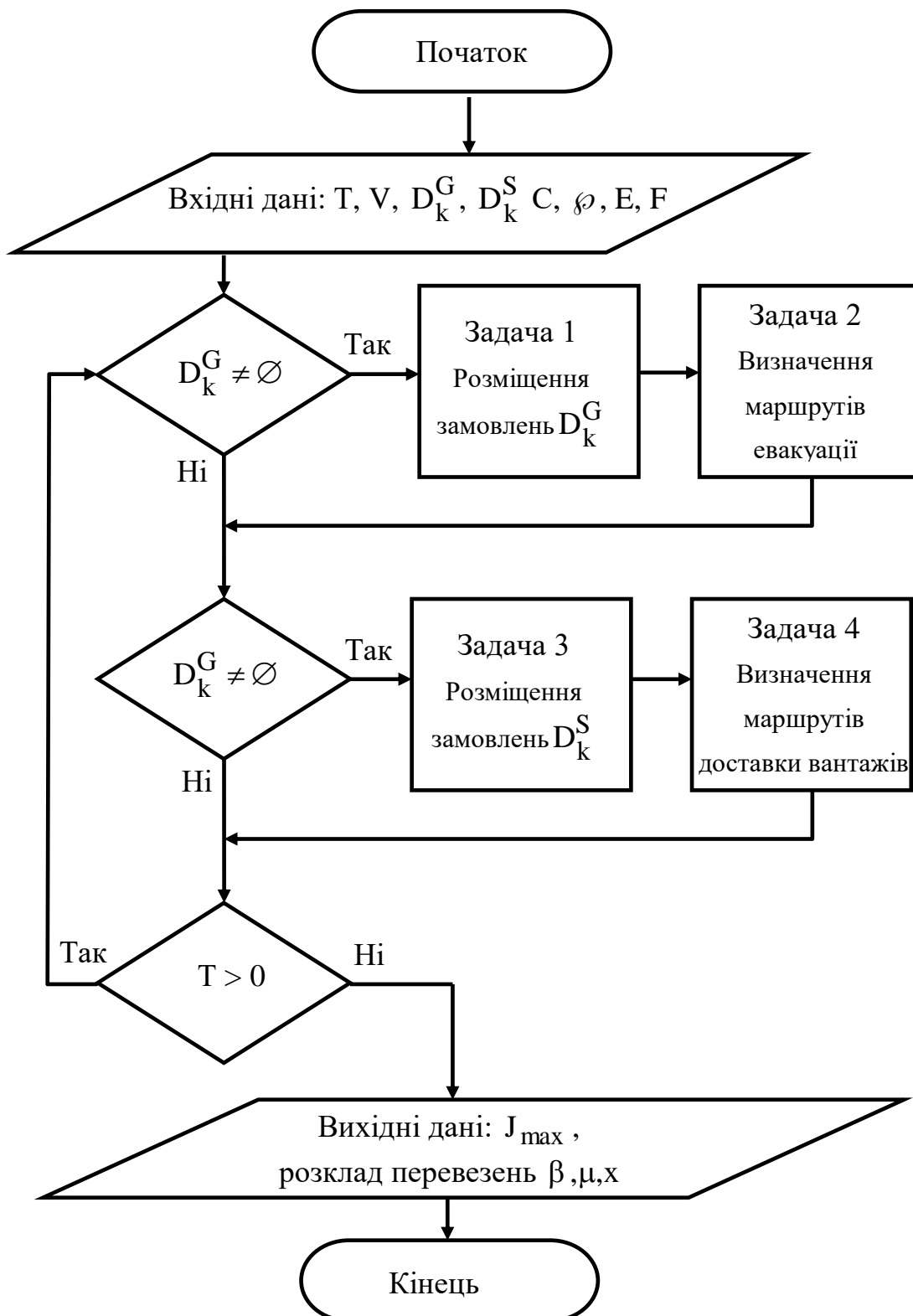


Рисунок 12.8 – Алгоритм розв'язання загальної задачі мінімізації транспортних витрат СГЛ при оперативному плануванні ресурсів

Задача 1. Пошук раціонального розміщення замовлень  $D_k^G$  на евакуацію на горизонті планування  $[1, T]$ , або можливо у визначений день  $\tau$ .

Задача 2. Пошук маршруту виконання замовлень  $D_k^G$  для кожного часового такту  $t = 1, \dots, T$ .

Задача 3. Визначення раціонального плану виконання замовлень  $D_k^S$  на доставку вантажів у локації  $\wp_h$ .

Задача 4. Пошук маршруту виконання замовлень  $D_k^S$  для кожного часового такту  $t = 1, \dots, T$ .

## **Висновки**

Розглянуто систему гуманітарної логістики з організацією доставки вантажів та евакуації постраждалих. Побудовано динамічну модель виконання множини замовлень на визначеному горизонті планування з мінімізацією транспортних витрат.

Запропоновано теоретико-множинний опис СГЛ, функціонування якої розглядається на горизонті планування.

Розроблено багатокритеріальну математичну модель оптимізації транспортних витрат на обслуговування за рахунок оптимізації щоденних транспортних маршрутів. Представлена математична модель дозволяє виконувати стратегічне та оперативне планування функціонування СГЛ.

Запропоноване розбиття оптимізаційної задачі на чотири ієрархічно упорядковані оптимізаційні задачі розміщення та маршрутизації.



## Література

1. Державна служба України з надзвичайних ситуацій : [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.dsns.gov.ua/> (дата звертання : 07.11.2019).
2. Jongman B. Increasing stress on disaster-risk finance due to large floods / B. Jongman, S. Hochrainer-Stigler, L. F. Jeroen // *Climate Change*. – 2014. – № 4. – P. 264–268.
3. Van Wassenhove L. N. Humanitarian aid logistics : Supply chain management in high gear / L. N. Van Wassenhove // *Journal of Operational Research Society*. – 2006. – № 57(5). – P. 475–489.
4. Liberatore F. Uncertainty in Humanitarian Logistics for Disaster Management : A Review / F. Liberatore, C. Pizarro, C. Simón de Blas // *Atlantis Computational Intelligence Systems*. – 2013. – Vol. № 7. – P. 45-74.
5. Смирнов І. Г. Логістика : Просторово-територіальний вимір / І. Г. Смирнов. – Київ : Обрії, 2004. – 335 с.
6. Кушчелеп Г. Гвинтокрилі машини по українськи: [Електронний ресурс] / Г. Кушчелеп. – Режим доступу : <https://defence-ua.com/index.php/statti/7117-hvyntokryli-mashynu-ro-ukrayinsky> (дата звернення : 07.11.2019).
7. Airbus Helicopters: [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.airbus.com/us/en/helicopters.html/products/EC225-specifications.asp> (дата звертання: 07.11.2019).
8. EC 145: [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.heliport.com.ua/en/helicopters/new-helicopters/eurocopter/ec-145/> (дата звернення : 07.11.2019).
9. Özdamar L. Models, solutions and enabling technologies in humanitarian logistics / L. Özdamar, M. A. Ertem // *European Journal of Operational Research*. – 2015. – № 244 (2015). – P. 55–65.
10. Balcik B. Last mile distribution in humanitarian relief / B. Balcik, B. M. Beamon, K. J. Smilowitz // *Journal of Intelligent Transportation Systems*. –

2008. – № 12. – P. 51–63.

11. Чуб І. А. Розв'язання задачі покриття потреби в ресурсах при ліквідації надзвичайної ситуації / І. А. Чуб, М. В. Новожилова, Ю. В. Михайловська, Р. В. Гудак // *Радіоелектроніка і інформатика*. – 2019. – №1. – С. 121–125.

12. Stapleton O. Last mile vehicle supply chain in the International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies / O. Stapleton, A. Pedraza-Martinez, L. N. Van Wassenhove // *SSRN Electronic Journal*. – 2009. – № 7(2009). – P. 29-48.

13. Ozdamar L. Planning helicopter logistics in disaster relief / L. Ozdamar // *Operations Research Spektrum*. – 2011 – № 33(2011). – P. 655–672.

14. Barbarosoglu G. An interactive approach for hierarchical analysis of helicopter logistics in disaster relief operations / G. Barbarosoglu, L. Ozdamar, A. Cevik // *European Journal of Operational Research*. – 2002. – Vol. № 140(1). – P. 118–133.

15. Caunhye A. M. Optimization models in emergency logistics : A literature review / A. M. Caunhye, X. Nie, S. Pokharel // *Socio-Economic Planning Sciences*. – 2012. – № 46. – P. 4–13.

16. Bozorgi-Amiri A. A multi-objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty / A. Bozorgi-Amiri, M. Jabalameli, S. Mirzapour Al-e-Hashem // *OR Spectrum*. – 2013. – № 35. – P. 905–933.

17. Dantzig G. B. The Truck Dispatching Problem / G. B. Dantzig, J. H. Ramser // *Management Science*. – 1959. – Vol. № 6. – P. 80-91.

18. Гвоздинський А. М. Дослідження інтелектуальних методів розв'язання оптимізаційних задач транспортного типу / А. М. Гвоздинський, М. Б. Обізна // *Радіоелектроніка та інформатика*. – 2013. – № 4. – С. 35–39.

19. Задоров В. Б. Застосування методів багатокритеріальної оптимізації до планування вантажних перевезень / В. Б. Задоров, О. В. Федусенко, А. О. Федусенко // *Управління розвитком складних систем*. – 2010. – № 2. – С. 27–31.

20. Hajghasem M. Optimal routing in supply chain aimed at minimizing

vehicle cost and supply / M. Hajghasem, A. A. Shojaie // *Procedia Economics and Finance*. – 2016. – Vol. № 36. – P. 353-362.

21. Szucs G. Decision support for route search and optimum finding in transport networks under uncertainty / G. Szucs // *Journal of Applied Research and Technology*. – 2015. – Vol. №13. – P. 125–134.

22. Кузнецов К. А. Подход к решению задачи оптимизации структуры дистрибьюторской компании / К. А. Кузнецов, В. А. Громов // *Вісник АМСУ*. – 2014. – № 1(51). – С. 94–103.

23. Lang Z. A vehicle routing problem solution considering alternative stop points / Z. Lang, E. Yao, W. Hu, Z. Pan // *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. – 2014. – Vol. № 138. – P. 584-591.

24. Giaglis G. M. Minimizing logistics risk through real-time vehicle routing and mobile technologies : Research to date and future trends / G. M. Giaglis, I. Minis, A. Tatarakis, V. Zeimpekis // *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. – 2004. – Vol. № 34. – P. 749-764.

25. Pillac V. A review of dynamic vehicle routing problems / Pillac V., Gendreau M., Gu´eret C., Medaglia A. // *European Journal of Operational Research*. – 2013. – Vol. № 225 – P. 1-11.

26. Новожилова М. В. Динамічна модель оптимізації транспортних витрат з урахуванням невизначеності термінів доставки / М. В. Новожилова, Є. М. Литвиненко // *Радіоелектроніка та інформатика*. – 2016. – № 1. – С. 27-31.

27. Петров Е. Г. Методи і засоби прийняття рішень у соціально-економічних системах / Е. Г. Петров, М. В. Новожилова, І. В. Гребеннік. – Київ: Техніка, 2004. – 256 с.

28. Чуб О.І., Новожилова М.В. Оптимальний розподіл ресурсів при реалізації проектів реконструкції інженерних мереж в мультипроектному середовищі / Чуб О.І., Новожилова М.В. // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – 2013. – Вип. 6. С. 67-75.

## **12 ОПТИМІЗАЦІЯ ТРАНСПОРТНИХ ВИТРАТ ПРИ ЛІКВІДАЦІЇ ПРОСТОРОВО-РОЗПОДІЛЕНОЇ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ**

*І.А. Чуб, Р.В. Гудак, Ю.М. Михайловська*

12.1 Планування ресурсного забезпечення ліквідації надзвичайної ситуації

12.2 Опис системи гуманітарної логістики

12.3 Властивості постановки задачі

12.4 Динамічна модель оптимізації транспортних витрат системи гуманітарної логістики

Висновки