

УДК 656.073

**ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ РАЦІОНАЛЬНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ  
ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ У ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ**

**Г.С. Прокудін, професор, д.т.н., М.Г. Іщенко, аспірант,  
О.І. Цуканов, аспірант, О.Г. Прокудін, аспірант,  
Національний транспортний університет, м. Київ**

*Анотація.* Запропоновано новий підхід до раціональної організації вантажних перевезень у транспортних системах, який враховує наявність пропускних спроможностей транспортних комунікацій, одночасне перевезення декількох неоднорідних вантажів, перетворення сітьових моделей подання вантажних перевезень у матричні моделі та інші.

*Ключові слова:* транспортна система, вантажні перевезення, раціональна організація.

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ РАЦИОНАЛЬНОЙ  
ОРГАНИЗАЦИИ ГРУЗОВЫХ ПЕРЕВОЗОК В ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ**

**Г.С. Прокудин, профессор, д.т.н., Н.Г. Ищенко, аспирант,  
А.И. Цуканов, аспирант, А.Г. Прокудин, аспирант,  
Национальный транспортный университет, г. Киев**

*Анотация.* Предложен новый подход к рациональной организации грузовых перевозок в транспортных системах, который учитывает наличие пропускных способностей транспортных коммуникаций, одновременную перевозку нескольких неоднородных грузов, преобразование сетевых моделей представления грузовых перевозок в матричные модели и другие.

*Ключевые слова:* транспортная система, грузовые перевозки, рациональная организация.

**THEORETICAL AND APPLIED ASPECTS OF RATIONAL ORGANIZATION  
OF CARGO TRANSPORTATION IN TRANSPORT SYSTEMS**

**G. Prokudin, Professor, Doctor of Technical Science, N. Ishchenko, postgraduate,  
A. Cukanov, postgraduate, A. Prokudin, postgraduate,  
National Transport University, Kyiv**

*Abstract.* A new approach of rational organization of cargo transport in transport systems, which account for capacities of transport communications, simultaneous transportation of multiple heterogeneous cargo, transformation of network models for representation of cargo transportation into matrix models and other ones is offered.

*Key words:* transport system, cargo transportation, rational organization.

**Вступ**

Сучасний стан економіки передових країн світу на сьогодні не мислиться без відповідного високого рівня розвитку їх транспортних систем (ТС), призначених, в першу чергу, для задоволення потреб народного господарства цих країн в ефективних перевезеннях пасажирів і вантажів. Причому остан-

нім часом намітилася тенденція світової економіки до транснаціонального проникнення й об'єднання [1], яка висуває додаткові вимоги до спільного використання різних видів транспорту і, як наслідок цього, підвищення оперативності здійснення перевезень різно-рідних вантажів. Виходячи з того, що приблизно 80 % всього світового обсягу перевезень пасажирів і вантажів [2] припадає на

авіаційний, автомобільний і залізничний види транспорту, спробуємо уявити перевізний процес цих видів транспорту у вигляді узагальненої моделі вантажних перевезень.

У даній статті авторами запропоновано новий підхід до раціональної організації вантажних перевезень у транспортних системах, який враховує наявність пропускних спроможностей транспортних комунікацій, одночасне перевезення декількох неоднорідних вантажів, перетворення сітьових моделей подання вантажних перевезень у матричні моделі та інші.

### Аналіз публікацій

Незважаючи на великий спектр розгляду проблематики вирішення сітьових транспортних задач щодо оптимізації перевезень вантажів і значущості отриманих результатів, необхідно визнати, що більшість розроблених методів успішно застосовуються при розв'язанні задач, заданих у матричній формі. Для зазначеного класу сітьових транспортних задач було розроблено досить досконали методи їх розв'язання (Дейкстра Е., Флойд Р., Канторович Л.В., Бідняк М.Н., Воркут А.І., Четверухін Б.М., Прокудін Г.С.) [3–9].

Однак досить вагомим недоліком матричних методів оптимізації транспортних задач є те, що вони спроможні дати оптимальний план перевезень лише на транспортній мережі (ТМ) з орієнтованими графами, тобто за чіткого дотримання прийнятих задалегідь напрямків переміщення вантажів у транспортній мережі від джерел вантажів безпосередньо до їх споживачів.

У результаті проведених наукових досліджень та експериментальних перевірок був розроблений метод зведення сітьових транспортних задач, які задаються у вигляді ТМ, до класичного матричного виду [9], а також запропоновані підходи до їх розв'язання за допомогою стандартних методів (симплексного, розподільного, методу потенціалів і т.д.). Цей метод був розроблений після аналізу методів Дейкстри Е. [3] (визначення найкоротшого шляху між двома вершинами графа) і Флойда Р. [4] (визначення найкоротших шляхів між усіма вершинами графа). Він принципово по-новому розв'язує цю задачу і визначає найкоротші шляхи тільки між постачальниками і споживачами

предмета перевезень, що повністю відповідає сутності постановки транспортної задачі.

### Мета і постановка задачі

Метою дослідження є розробка нового підходу до раціональної організації вантажних перевезень у транспортних системах. Об'єктом дослідження є транспортний процес перевезення вантажів, а предметом – моделі й методи оптимізації вантажних перевезень у транспортних мережах. Для досягнення мети аналізується перелік усіх обмежень, які виникають у процесі транспортування вантажів.

### Раціональна організація вантажних перевезень у транспортних системах

Припустимо, що ми маємо ряд населених пунктів (н/п) –  $n$ , які сполучені між собою відповідними транспортними комунікаціями. Слід зауважити, що перевезення вантажів між н/п можуть виконуватися як будь-яким видом транспорту (автомобільним, залізничним, авіаційним або водним), так і будь-якими їх комбінаціями.

В одних н/п  $\{B_1^+, B_2^+, \dots, B_n^+\}$  є запаси  $k$ -видів вантажу, відповідно в об'ємах  $\{b_{11}^+, b_{12}^+, \dots, b_{ij}^+, \dots, b_{nk}^+\}$ , а в інших н/п  $\{B_1^-, B_2^-, \dots, B_n^-\}$  потрібні ці вантажі в об'ємах, відповідно,  $\{b_{11}^-, b_{12}^-, \dots, b_{ij}^-, \dots, b_{nk}^-\}$ . У першому випадку ці н/п називаються постачальниками, а в другому – споживачами вантажів, причому один і той же н/п може одночасно виступати як у ролі постачальника одного виду вантажу, так і у ролі споживача іншого виду вантажу. (Тут перший нижній індекс і означає н/п, а другий нижній індекс –  $j$ -вид вантажу, наявний у вказаному н/п при верхньому індексі, рівному «+», і за потреби у вказаному н/п при верхньому індексі, рівному «-»).

У загальному випадку завдання полягає в доставці (по змозі) усіх об'ємів  $\{b_{11}^+, b_{12}^+, \dots, b_{ij}^+, \dots, b_{nk}^+\}$   $k$ -видів вантажу від постачальників  $\{B_1^+, B_2^+, \dots, B_n^+\}$  до їх споживачів  $\{B_1^-, B_2^-, \dots, B_n^-\}$ , відповідно в об'ємах  $\{b_{11}^-, b_{12}^-, \dots, b_{ij}^-, \dots, b_{nk}^-\}$  (також по змозі). Причому сумарні об'єми за кожним з  $k$ -видів вантажу, що знаходяться в усіх

постачальників, можуть не співпадати із сумарними заявками на ці ж самі види вантажу в усіх їх споживачів.

При такій організації перевезень вантажів слід зробити декілька зауважень, а саме:

- перевезення вантажів можуть здійснюватися через н/п, в яких потрібні ці ж самі вантажі;
- перевезення вантажів також можуть здійснюватися через декілька проміжних транспортних вузлів;
- одночасно може перевозитися декілька видів вантажу;
- додатковими обмеженнями перевізного процесу виступають пропускні можливості транспортних вузлів (н/п) і пропускні спроможності автомобільних і залізничних магістралей.

Представимо описану вище модель перевізного процесу в матричному вигляді (табл. 1). Матриця має розмірність  $M \times M$ , де  $M$  дорівнює  $n \cdot k$ . На місцях перетину рядків і стовпців стоять пропускна спроможність  $d_{ijl}$ , час доставки  $t_{ijl}$  і вартість перевезення  $c_{ijl}$  одиниці  $l$ -го виду вантажу між  $i$ -м пунктом постачання і  $j$ -м пунктом споживання, яка повинна здійснюватися найкоротшими шляхами, тобто:

$c_{ijl}$  – вартість перевезення одиниці  $l$ -го виду вантажу від  $i$ -го пункту постачання до  $j$ -го пункту споживання;

$d_{ijl}$  – пропускна спроможність маршруту від  $i$ -го пункту постачання до  $j$ -го пункту споживання при перевезенні  $l$ -го виду вантажу;

$t_{ijl}$  – час доставки  $l$ -го виду вантажу від  $i$ -го пункту постачання до  $j$ -го пункту споживання.

Таблиця 1 Модель перевізного процесу в матричному вигляді

Н/п		$B_1^-$	...	$B_i^-$	...	$B_n^-$
	Обсяги перевезень	$b_{11}^-$	...	$b_{1k}^-$	...	$b_{nk}^-$
$B_1^+$	$b_{11}^+$	0	...	0	...	0
	$b_{1k}^+$	0	...	0	...	0
$B_i^+$	$b_{i1}^+$	$c_{i11}$ $d_{i11}$ $t_{i11}$	...	0	...	0
	$b_{ik}^+$	0	...	$c_{i1k}$ $d_{i1k}$ $t_{i1k}$	...	0
$B_n^+$	$b_{n1}^+$	$c_{n11}$ $d_{n11}$ $t_{n11}$	...	0	...	0
	$b_{nk}^+$	0	...	$c_{n1k}$ $d_{n1k}$ $t_{n1k}$	...	0

Математично завдання здійснення комплексних транспортних перевезень  $l$ -х видів вантажу ( $l = \overline{1, k}$ ) від  $i$ -х пунктів постачання ( $i = \overline{1, n}$ ) до  $j$ -х пунктів споживання ( $j = \overline{1, n}$ ) зводиться до знаходження таких обсягів перевезень  $x_{ijl}$ , які задовольняли б таким обмеженням

$$\sum_{j=1}^n x_{ijl} \leq b_{il}^+ \text{ для } (i = \overline{1, n}; l = \overline{1, k}; i \neq j), \quad (1)$$

тобто вивезено з кожного  $i$ -го пункту постачання у всі  $j$  пунктів споживання  $l$ -го виду вантажу повинно бути не більше наявного у нього обсягу цього  $l$ -го виду вантажу  $b_{il}^+$ ;

$$\sum_{i=1}^n x_{ijl} \leq b_{il}^- \text{ для } (j = \overline{1, n}; l = \overline{1, k}; i \neq j), \quad (2)$$

тобто доставлено в кожний  $j$ -й пункт споживання з усіх  $i$  пунктів постачання  $l$ -го виду вантажу повинно бути не більше, ніж заявлений ним обсяг цього  $l$ -го виду вантажу  $b_{il}^-$ ;

$$x_{ijl} \leq d_{ijl} \text{ для } (i = \overline{1, n}; j = \overline{1, n}; l = \overline{1, k}; i \neq j), \quad (3)$$

тобто вантаж, що перевозиться, не повинен перевищувати пропускних спроможностей транспортних комунікацій ТС;

$$T \geq t_{ijl} \text{ для } (i = \overline{1, n}; j = \overline{1, n}; l = \overline{1, k}; i \neq j), \quad (4)$$

тобто час доставки будь-якого вантажу не повинен перевищувати певного заданного часу  $T$ ;

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^k x_{ijl} * c_{ijl} \Rightarrow \min \text{ для } (i = \overline{1, n}; j = \overline{1, n}; l = \overline{1, k}; i \neq j) \text{ при } x_{ijl} \geq 0, \quad (5)$$

тобто вартість сумарних позитивних перевезень усіх вантажів має бути мінімальною.

Розглянута у даній роботі ТС України та Західної Європи представлена 602 містами — населеними пунктами (н/п), з'єднаними між собою відповідними транспортними комунікаціями. Необхідною умовою належності н/п до цієї множини є наявність автомобільних доріг, що з'єднують цей н/п у загальну ТС. Причому в н/п можуть бути розташовані або залізничні станції (з/с), авіаційні порти (а/п), водні порти (в/п) або їхні різні комбінації, які можна класифікувати таким чином:

- |                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| – 153 н/п без з/с, а/п або в/п | – $M_1$ ; |
| – 316 н/п тільки з з/с         | – $M_2$ ; |
| – 4 н/п тільки з а/п           | – $M_3$ ; |
| – 52 н/п тільки з в/п          | – $M_4$ ; |
| – 38 н/п з з/с і а/п           | – $M_5$ ; |
| – 4 н/п з а/п і в/п            | – $M_6$ ; |
| – 26 н/п з з/с і в/п           | – $M_7$ ; |
| – 9 н/п з з/с, а/п і в/п       | – $M_8$ , |
- причому ми маємо таке співвідношення

$$M \in M_1 \cup M_2 \cup M_3 \cup M_4 \cup M_5 \cup M_6 \cup M_7 \cup M_8, \quad (6)$$

де  $M$  – множина всіх н/п.

Виходячи з того, що перевезення між н/п можуть здійснюватися або з використанням одного виду транспорту, або декількох, ми маємо такі варіанти перевезення вантажів:

1) перевезення автомобільним транспортом здійснюються від н/п постачальника будь-якого типу до н/п споживача також будь-якого типу, тобто за такою схемою

н/п 1 ÷ 8 типу → н/п 1 ÷ 8 типу.

*Примітка:* знак → означає процес перевезення;

2) перевезення авіаційним транспортом припускають наявність у н/п постачальника і споживача вантажу а/п і здійснюються за такою схемою

н/п 3,5,6,8 типу → н/п 3,5,6,8 типу;

3) перевезення залізничним транспортом припускають наявність у н/п постачальника і споживача вантажу з/с і здійснюються за такою схемою

н/п 2,5,7,8 типу → н/п 2,5,7,8 типу;

4) перевезення водним транспортом припускають наявність у н/п постачальника і споживача вантажу в/п і здійснюються за такою схемою

н/п 4,6,7,8 типу → н/п 4,6,7,8 типу;

5) перевезення спочатку автомобільним, а потім авіаційним видами транспорту припускають переміщення вантажу спочатку від н/п постачальника будь-якого типу автомобільним транспортом до найближчого до нього а/п і потім авіаційним транспортом до н/п споживача вантажів, що має а/п і здійснюються за такою схемою

н/п 1 ÷ 8 типу → н/п 3,5,6,8 типу →  
→ н/п 3,5,6,8 типу;

6) перевезення спочатку авіаційним, а потім автомобільним видами транспорту припускають переміщення вантажу спочатку від н/п постачальника, що має а/п авіаційним транспортом до найближчого до н/п споживача вантажу а/п і потім автомобільним транспортом до н/п споживача вантажу будь-якого типу і здійснюються за такою схемою

н/п 3,5,6,8 типу → н/п 3,5,6,8 типу →  
→ н/п 1 ÷ 8 типу;

7) перевезення спочатку автомобільним, після – авіаційним, а потім знову автомобільним видами транспорту припускають переміщення вантажу автомобільним транспортом спочатку від н/п постачальника будь-якого типу до найближчого до нього а/п, після авіаційним транспортом до найближчого до н/п споживача вантажу а/п і потім автомобільним транспортом до н/п споживача вантажу будь-якого типу й здійснюються за такою схемою

н/п 1 ÷ 8 типу → н/п 3,5,6,8 типу →  
→ н/п 3,5,6,8 типу → н/п 1 ÷ 8 типу;

8) перевезення спочатку автомобільним, а потім водним видами транспорту припускають переміщення вантажу спочатку від н/п постачальника будь-якого типу автомобільним транспортом до найближчого до нього в/п і потім водним транспортом до н/п споживача вантажів, що має в/п і здійснюються за такою схемою

н/п 1 ÷ 8 типу → н/п 4,6,7,8 типу →  
→ н/п 4,6,7,8 типу;

9) перевезення спочатку водним, а потім автомобільним видами транспорту припускають переміщення вантажу спочатку від н/п постачальника, що має в/п водним транспортом до найближчого до н/п споживача вантажу в/п і потім автомобільним транспортом до н/п споживача вантажу будь-якого типу і здійснюються за такою схемою

н/п 4,6,7,8 типу → н/п 4,6,7,8 типу →  
→ н/п 1 ÷ 8 типу;

10) перевезення спочатку автомобільним, після водним, а потім знову автомобільним видами транспорту припускають переміщення вантажу автомобільним транспортом спочатку від н/п постачальника будь-якого типу до найближчого до нього в/п, після – водним транспортом до найближчого до н/п споживача вантажу в/п і потім автомобільним транспортом до н/п споживача вантажу будь-якого типу і здійснюються за такою схемою

н/п 1 ÷ 8 типу → н/п 4,6,7,8 типу →  
→ н/п 4,6,7,8 типу → н/п 1 ÷ 8 типу;

11) перевезення спочатку автомобільним, а потім залізничним видами транспорту припускають переміщення вантажу спочатку від н/п постачальника будь-якого типу автомобільним транспортом до найближчої до нього з/с і потім залізничним транспортом до н/п споживача вантажів, що має з/с і здійснюються за такою схемою

н/п 1 ÷ 8 типу → н/п 2,5,7,8 типу →  
→ н/п 2,5,7,8 типу;

12) перевезення спочатку залізничним, а потім автомобільним видами транспорту припускають переміщення вантажу спочатку від н/п постачальника, що має з/с залізничним транспортом до найближчої до н/п споживача вантажу з/с і потім автомобільним транспортом до н/п споживача вантажу будь-якого типу й здійснюються за такою схемою

н/п 2,5,7,8 типу → н/п 2,5,7,8 типу →  
→ н/п 1 ÷ 8 типу;

13) перевезення спочатку автомобільним, після залізничним, а потім знову автомобільним видами транспорту припускають переміщення вантажу автомобільним транспортом спочатку від н/п постачальника будь-якого типу до найближчої до нього з/с, після залізничним транспортом до найближчої до н/п споживача вантажу з/с і потім автомобільним транспортом до н/п споживача вантажу будь-якого типу і здійснюються за такою схемою

н/п 1 ÷ 8 типу → н/п 2,5,7,8 типу →  
→ н/п 2,5,7,8 типу → н/п 1 ÷ 8 типу.

Слід вказати на той факт, що перевезення можуть здійснюватися обов'язково найкоротшими шляхами, можливо, через декілька проміжних (транзитних) н/п. Показниками якості перевезень при цьому є час або вартість їх виконання.

### Висновки

Основні наукові результати, отримані у даній роботі, полягають у такому:

– проведений аналіз існуючих підходів і методів з управління перевезеннями вантажів у ТС з урахуванням світового досвіду. На підставі цього аналізу виявлено недоліки цих методів, які істотно обмежують, а іноді й не

вирішують більшості практичних задач, пов'язаних з ефективним транспортуванням вантажів;

– приведений опис процесу вантажних перевезень у ТС дає можливість системно підійти до задачі оптимізації транспортних перевезень неоднорідних вантажів за комбінованою схемою використання різних видів транспорту (авіаційного, автомобільного, водного і залізничного), з урахуванням усього спектру обмежень, що існують у системах подібного роду;

– дано математичне формулювання моделі перевезень вантажів у ТС, яке повністю урахує весь спектр виникаючих при цьому умов, а саме: наявність пропускних спроможностей транспортних комунікацій, перевезення декількох вантажів [10];

– спроектована база даних інфраструктури усіх видів транспорту у цілому представляє ТС України та Західної Європи, яка за допомогою відповідної процедури перетворюється у матриці транспортних кореспонденцій. Матричне подання перевізного процесу, у свою чергу, дозволяє описати його у вигляді відповідної математичної моделі і застосувати при її аналізі й обробці методи і засоби сучасних інформаційних технологій [11];

– спроектована інформаційна система підтримки прийняття рішень з управління вантажними перевезеннями в ТС України та Західної Європи [12].

### Література

1. Акуленко А.А. МТК ТРАСЕКА (Європа-Кавказ-Азія) у світовій транспортній системі та існуюча географія перевезень / А.А. Акуленко, Й.М. Кранц, М.Н. Левчук // Вісник НТУ. – 2012. – № 17. – С. 254–258.
2. Головніна О.Г. Аналіз ринку вантажних автомобільних перевезень в Україні / О.Г. Головніна, С.В. Горілий // Вісник ТАУ, УТУ. – 2013. – № 18. – С.164–167.
3. Данциг Дж. Линейное программирование, его применения и обобщения / Дж. Данциг. – М.: Прогресс, 1966. – 600 с.
4. Гудман С. Введение в разработку и анализ алгоритмов / С. Гудман, С. Хидетниemi. – М.: Мир, 1981. – 368 с.
5. Канторович Л.В. Применение математических методов в вопросах анализа грузопотоков / Л.В. Канторович, М.К. Гаурин // Проблемы повышения эффективности работы транспорта, 1949. – С. 187–199.
6. Бидняк М.Н. Математические основы управления / М.Н. Бидняк. – К.: КАДИ, 1977. – 128 с.
7. Воркут А.И. Грузовые автомобильные перевозки / А.И. Воркут. – К.: Вища школа, 1986. – 447 с.
8. Четверухін Б.М. Дослідження операцій в транспортних системах. Ч. I. Методи лінійного програмування та їх застосування / Б.М. Четверухін. – К.: УТУ, 2000. – 91 с.
9. Прокудін Г.С. Моделі і методи оптимізації перевезень у транспортних системах: монографія / Г.С. Прокудін. – К.: НТУ, 2006. – 224 с.
10. А.с. № 48531 Держ. служба інтелектуальної власності України. Літературний письмовий твір наукового характеру «Математична модель організації пасажирських та вантажних перевезень» / Г.С. Прокудін О.С. Дудник, М.Г. Іщенко; заяв. 30.01.2013 № 48731; реєстр. 01.04.2013.
11. А.с. № 48532, Державна служба інтелектуальної власності України. Літературний письмовий твір наукового характеру «База даних транспортно-дорожнього комплексу України і Західної Європи» / Г.С. Прокудін, О.С. Дудник, М.Г. Іщенко; заяв. 30.01.2013 № 48732; реєстр. 01.04.2013.
12. А.с. № 48530, Державна служба інтелектуальної власності України. Комп'ютерна програма «Програмно-інструментальний комплекс оптимізації пасажирських та вантажних перевезень в транспортних системах України і Західної Європи» / Г.С. Прокудін, О.С. Дудник, М.Г. Іщенко; заяв. 30.01.2013 № 48730; реєстр. 01.04.2013.

Рецензент: П.Ф. Горбачов, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 2 грудня 2013 р.