

УДК 656.225:629.21

## РОЗРОБЛЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ЗЕРНОВИХ ВАНТАЖІВ З УРАХУВАННЯМ СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ ГАЛУЗІ

Канд. техн. наук Д. В. Арсененко, д-р техн. наук Д. В. Ломотько,  
канд. техн. наук О. В. Ковальова

## DEVELOPMENT OF THE OPTIMUM TECHNOLOGY FOR THE TRANSPORTATION OF GRAIN LOADS TAKING INTO ACCOUNT THE EXISTING TRENDS OF THE INDUSTRY

PhD (Tech.) D. Arsenenko, Dr. Sc. (Tech.) D. Lomotko, PhD (Tech.) O. Kovalova

**Анотація.** Розроблено процедуру управління розподілу зернових вантажів на припортових станціях. Створено перелік необхідних умов, за яких впровадження ступеневих маршрутів нівелює проблематику безпосереднього розподілу вантажів по місцях вивантаження в портовій інфраструктурі. Запропонована технологія розподілу масових вантажів дає змогу задіяти більшу кількість учасників перевізного процесу і створити умови для залучення інших попутних і паралельних вантажів.

**Ключові слова:** логістична технологія, зернові, масові вантажі, залізничний транспорт, логічний контроль, оператор інфраструктури, двоетапна транспортна задача, план перевезень.

**Abstract.** An algorithm and management procedure for the distribution of grain cargoes at port stations have been developed. A list of necessary conditions has been created under which the introduction of graded routes eliminates the problem of direct distribution of cargo by unloading points in the port infrastructure. The proposed technology for the distribution of bulk cargo allows to attract a larger number of participants in the transportation process and create conditions for the attraction of other accompanying cargo.

The above problems of railway transport, a significant reduction in the volume of transportation against the background of the existence of a fairly wide network of railways form a trend for route shipments, the vast majority of which, in turn, go to the port.

The introduction of staged loads as a compromise in the conditions of the trends acquired by the industry requires the creation of the necessary conditions along the entire route of the cargo. Market conditions as the main driver of the transportation process require a proactive response to variability. It is this approach with the use of transitional phases in the view of port stations that gives the technology such qualities that it becomes especially relevant when the operator of port stations becomes effective.

Areas of concentration of freight work, potential infrastructure facilities and port stations, where the formation of groups of wagons for unloading at the ports will take place, were determined by systematizing the collected information and identifying patterns that can be introduced taking into account the existing system of restrictions.

Looking directly at the composition of the transport sector for the above-mentioned period, it turns out that the share of cargo processed in Ukrainian ports is 159 million tons. For comparison, in the same period, rail transport was 314.3 million tons, road 222.6 million tons.

*The above problems of railway transport, a significant reduction in the volume of transportation against the background of the existence of a fairly wide network of railways form a trend for route shipments, the vast majority of which, in turn, go to the port. Analyzing the above in the existing conditions, it is the ports that should set the vector for both the formation of sending and step routes based on the principles of resource conservation.*

**Keywords:** *logistics technology, grain, bulk cargo, railway transport, logical control, infrastructure operator, two-stage transport task, transportation plan.*

**Вступ.** Аналіз роботи залізничного транспорту за останні роки свідчить про тенденцію скорочення обсягів перевезення, пов'язану з об'єктивними проблемами розвитку традиційної для кожного з регіонів країни промисловості, загальне скорочення обсягів транзитних вантажів. Кількісні та якісні експлуатаційні показники фіксують антирекорди. Так, обіг руху вагона зерновоза з вагонного відправлення може становити до 30 діб, і це випадки з вагонних відправлень, які мали місце до повномасштабної війни.

Зменшення обсягів вантажних перевезень в абсолютних числах становить, за різними оцінками, скорочення на 31 % за останні 10 років. Відправний на момент формування аналітики 2021 рік показує, що частка ВВП від аграрного, видобувного та переробного секторів, за різними оцінками, коливається в межах 25-27 %, і невід'ємну складову у формуванні таких показників становить транспортна система. Розглядаючи ситуацію стратегічно, частка вантажів, які були перероблені за встановлений період в українських портах, становить 159 млн т, у цей же період залізничний транспорт – 314,3 млн т, автомобільний – 222,6 млн т.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сформовано наукові підходи до формування організації роботи припортових станцій на базі новоутвореного структурного підрозділу «Оператор припортових станцій» [1] за рахунок упровадження оптимальної моделі роботи дослідного полігона, ринковий алгоритм роботи припортових станцій.

Зважаючи на постановку завдання в контексті реформування за сучасних умов,

розглянуто питання стратегічного оцінювання роботи галузі [2], способи нівелювання недоліків стану залізничної інфраструктури за рахунок впровадження СППР [3, 4] і формування принципів організації місцевої роботи в умовах скорочення обсягів перевезень [5]. Важливим аспектом у формуванні технології перевезень зернових вантажів залізницями України є розуміння процесів вантажоутворення, яке і формує попит на транспортну послугу [6, 9]. Необхідність формувати перевізний процес в умовах скорочення обсягів перевезень, стану інфраструктури та припортового характеру формування зернових відправлень [7] потребує враховувати ці чинники. Використання сучасних інформаційних та інтелектуальних технологій є необхідною складовою будь-якого логістичного процесу сьогодні, і врахування такого чинника має свої особливості на залізниці в наш час [8].

Серед недоліків слід визначити відсутність сучасних програм і наукових пропозицій, сумісних із ОПС. Визначені необхідністю ІКС також не мають наявних напрацювань.

**Визначення мети та задачі дослідження.** Формування технології перевезень зернових вантажів потребує враховувати наведені реалії сьогодення та водночас створювати відкрите інформаційне поле, яке дасть змогу не тільки оптимізувати експлуатаційні показники, а й залучити учасників перевізного процесу на всіх рівнях. Завданням дослідження є:

- провести аналіз місцевого вантажоутворення в умовах скорочення

обсягів перевезення, дефіциту інвестування і стану інфраструктури;

- провести аналіз вантажної та комерційної роботи припортових станцій;

- сформувати вимоги до єдиного інформаційного простору для всіх учасників перевізного процесу;

- оптимізувати технологічні процеси перевезення зернових вантажів на принципах ресурсозбереження.

Методологічною основою для аналізу сучасної системи місцевого вантажоутворення, варіативної маршрутизації та оптимальної роботи припортових станцій є системний аналіз, використання нечітких баз знань і методи математичної статистики. Райони концентрації вантажної роботи, потенційні інфраструктурні об'єкти і припортові станції, на яких відбуватиметься формування груп вагонів під вивантаження в порти, було визначено за допомогою систематизації зібраної інформації та виявлення закономірностей, які можна запровадити, зважаючи на наявну систему обмежень. За визначення економічної ефективності такого впровадження було використано метод середніх темпів.

#### **Основна частина дослідження.**

Практичним завданням дослідження є створення умов, за яких формування ступеневого маршруту не має у своїй системі обмежень критерію різних вантажоодержувачів або різних місць вивантаження в портовій інфраструктурі.

Ступеневий маршрут на сьогодні – це більше ніж альтернатива за вагонними відправленнями, що дає змогу зберегти клієнтів із невеликим обсягом навантаження і вивантаження. Увесь комплекс галузевих проблем має один із варіантів вирішення залучення інвестицій, і таке залучення повинно мати збалансований характер.

Розглядаючи принцип вантажоутворення зернових вантажів, слід зазначити, що в основі будь-якого рішення вантажовідправника або вантажоодержувача лежить комерційна складова, яка і є механізмом загального процесу. Процес експорту

зернових вантажів – це складна інтерпретація закупівельної та розподільчої логістики з визначеною системою обмежень у вигляді фінансового, складського і транспортного секторів. Нехтувати цими процесами, на думку монополіста, не є конструктивним, тим паче з огляду на роботу автомобільного транспорту, який за рахунок саме таких обґрунтованих підходів останні 10 років лише зміцнює свої позиції.

Розглянемо схему руху зернових вантажів із моменту формування залізничної відправки на пункті концентрації до безпосередньо відправної точки експорту (рис. 1).

Одним із рішень подібного практичного завдання є застосування двоетапної транспортної задачі – формування ступеневих або відправницьких маршрутів у пунктах комерційної концентрації з подальшим перерозподілом у припортових станціях до місць фактичного вивантаження.

Багатоетапна транспортна задача лінійного програмування може бути розв'язана з застосуванням стандартних алгоритмів, а наявність додаткової умови впливає лише на послідовність розв'язання задачі. У нашому випадку додаткова умова – це наявність у складі одного поїзда вантажів із призначенням у різні порти або термінали, які можуть бути як у ступеневих маршрутах, так і в складі збірного поїзда. Така потреба визначає ступінь впливу додаткових умов на послідовність розподілу вантажопотоків і етапність розв'язання задачі.

Для розв'язання задачі оптимізації розподілу зернових вантажів за типом двоетапного транспортного завдання лінійного програмування складають матрицю, до якої належать ресурси вантажовідправників і трейдерів  $a_i$ , потреби експортерів, які купують зерно на терміналах накопичення і відвантажують зернові вантажі безпосередньо в корабель  $b_j$ , і переробні можливості припортових станцій залежно від їхнього функціоналу  $d_k$ .

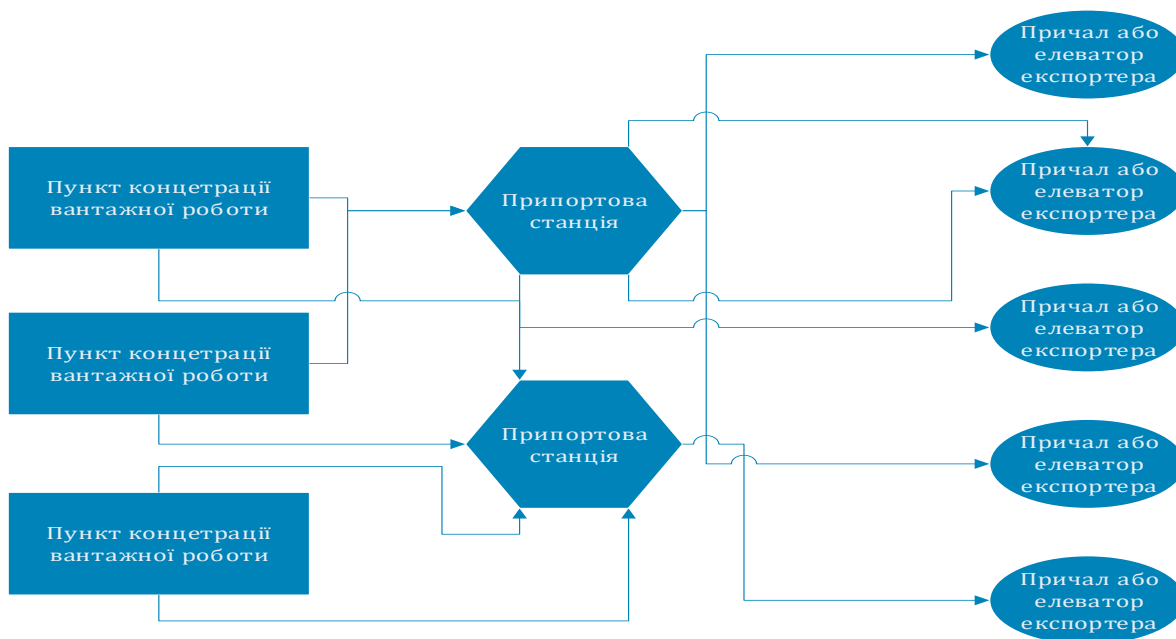


Рис. 1. Схема руху зернових вантажів із визначенням ключових інфраструктурних об’єктів, які впливають на формування залізничного відправлення

Розглянемо основні особливості послідовності розподілу вантажопотоків двоетапної транспортної задачі з прямими

поставками та наведемо її математичну модель (розв’язання за методом мінімального елемента):

$$C = \sum_{i=1}^s \sum_{k=1}^f y_{ik} z_{ik} + \sum_{k=1}^f \sum_{j=1}^v y_{kj} z_{kj} + \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^v y_{ij} z_{ij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^f z_{ik} + \sum_{i=1}^v z_{ij} = a_i; \quad (i = \overline{1, s}), \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^s z_{ik} \leq d_k; \quad (k = \overline{1, f}), \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^f z_{ki} + \sum_{i=1}^s z_{ij} = b_j; \quad (j = \overline{1, v}), \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^v z_{ki} \leq d_k; \quad (k = \overline{1, f}), \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} a_i + b_j \leq d_k - \text{вантаж, прийнятий до перевезення } a_i, \text{ та вантаж, який перероблений} \\ \text{на припортовій станції } b_j, \text{ має відповідати потужностям } d_k \\ T_{Ai} + T_{Bj} \leq T_{\text{норм}} - \text{час доставлення вантажу має відповідати контрактним вимогам} \end{array} \right., \quad (6)$$

де (1)  $C_{min}$  – цільова функція, яка мінімізує витрати на транспортування зернових вантажів із пунктів концентрації вантажної роботи на дільницях до причалів або терміналів через припортові станції;

(2) – обмеження повного вивезення вантажу з пунктів концентрації вантажної роботи на дільницях;

(3) – обмеження можливої пропускної спроможності кожної з припортових станцій під час прибуття вантажу;

(4) – обмеження обов'язкового задоволення потреб кожного експортера на причалі або терміналі;

(5) – обмеження можливої пропускної спроможності кожної з припортових станцій під час відправлення вантажу безпосередньо на причали або порти;

(6) – сучасна система обмежень перевезення зернових вантажів за ринкових умов.

Як і в класичній транспортній задачі, необхідною та достатньою умовою розв'язання задачі є вимога збалансованості обсягів виробництва обсягів споживання  $\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j$ . За класичного розуміння транспортної задачі, якщо сума ресурсів

більше (менше) суми потреб, то для перетворення відкритої транспортної задачі в закриту вводять стовпець фіктивного споживача (рядок фіктивного відправника), потреби якого дорівнюють надлишку ресурсів (запаси якого дорівнюють надлишку потреб), проте, зважаючи на визначені умови договірних зобов'язань між трейдером та експортером і оператором перевізного процесу, така ситуація в нашому випадку унеможливується, що окремо виражено в системі обмежень.

Для визначення послідовності розподілу вантажопотоків необхідно порівняти загальну пропускну спроможність припортових станцій  $\sum_{k=1}^p d_k$  з обсягами заявок на перевезення  $\sum_{i=1}^m a_i$  та обсягами потреб вантажоодержувача з урахуванням технологічної ситуації на об'єктах інфраструктури  $\sum_{j=1}^n b_j$ . Розглянемо оптимальний варіант розв'язання нашої двоетапної транспортної задачі (рис. 2).

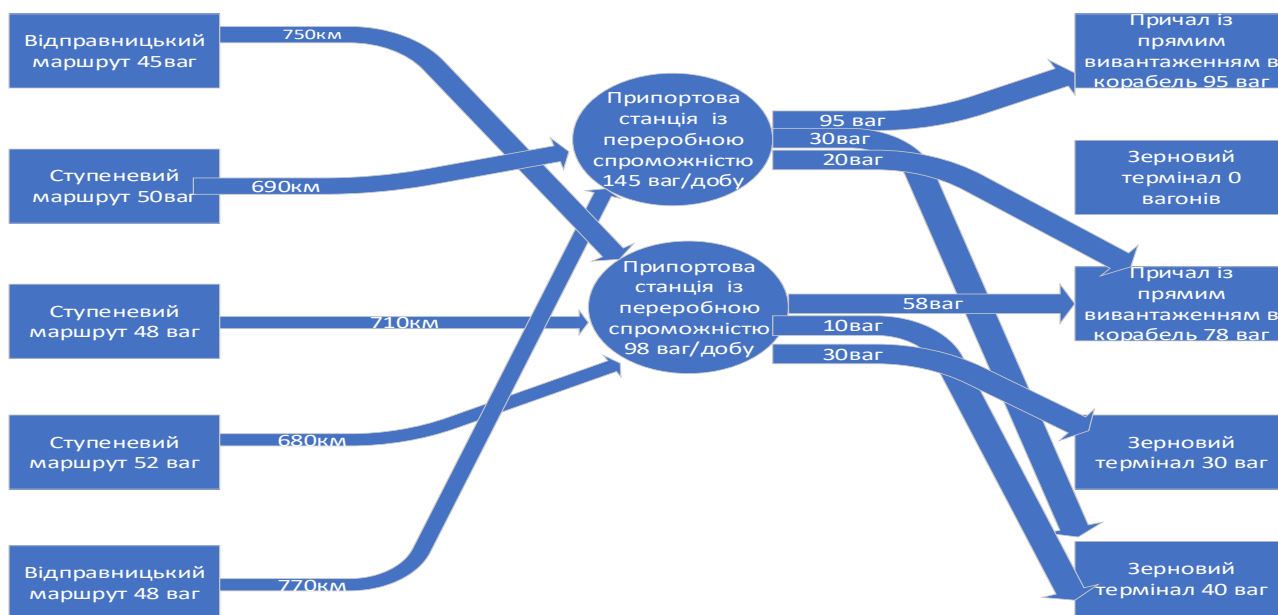


Рис. 2. Оптимальний план перевезення зернових вантажів у визначених умовах

Якщо загальна пропускна спроможність припортових станцій більше або дорівнює сумарним обсягам заявок на перевезення від вантажовідправників (трейдерів) і забезпечення потреб вантажоодержувачів (експортерів), це свідчить про те, що сумарні ємності припортових станцій можуть бути використані або повністю, або з резервом:

$$\sum_{k=1}^p d_k \geq \sum_{i=1}^m a_i \text{ та } \sum_{k=1}^p d_k \geq \sum_{j=1}^m b_j . \quad (7)$$

Послідовність розв'язання задачі в такому випадку та сама, як і в багатоетапній транспортній задачі без прямих поставок. У класичному розумінні розв'язання двоетапної транспортної задачі існує варіант, за якого загальна пропускна спроможність перевалочних пунктів менше сумарних обсягів виробництва та споживання, і такий варіант потребує окремого розв'язання

ємність кожної припортової станції в будь-якому плані перевезень однорідного вантажу буде використана повністю.

У цьому випадку мають місце три окремі транспортні задачі, і загальний оптимум значень цільової функції  $C$  дорівнює сумі оптимумів на трьох частинах задачі:

$$C = C_{nn-nv} + C_{nn-nc} + C_{nc-nv} , \quad (10)$$

де  $C_{nn-nv}$  – цільова функція, яка мінімізує витрати на транспортування вантажу з пунктів відправлення до пунктів призначення;

$$\sum_{k=1}^p d_k < \sum_{i=1}^m a_i \text{ та } \sum_{k=1}^p d_k < \sum_{j=1}^m b_j . \quad (8)$$

Задачу розв'язують у рамках єдиної моделі, якщо після розподілу в блоці (відправницькі маршрути і ступеневі з призначенням на один об'єкт інфраструктури) сумарних потужностей припортових станцій стає більше, ніж решти обсягів заявлених перевезень. Розв'язання такої задачі в нашому випадку не потрібно, і причиною тому є великі затрати об'єктів інфраструктури у випадку невиконання контрактних домовленостей із морським господарством, а безпосередні залізничні експлуатаційні витрати, які будуть накопичуватися під час розв'язання цієї задачі, унеможливають такий варіант. У цьому випадку оператор інфраструктури не дає вагони під навантаження, навіть не приймає вагони до перевезення і залишає вже завантажені поїзди в статусі «кинуті», у такий спосіб розтягуючи розв'язання задачі по своїй залізничній мережі.

За рівності сумарних потужностей пунктів перевалки з рештою обсягів виробництва та споживання, коли

$$\sum_{i=1}^m a_i - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} = \sum_{k=1}^p d_k \text{ та } \sum_{j=1}^n b_j - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} = \sum_{k=1}^p d_k , \quad (9)$$

$C_{nn-nc}$  – цільова функція, яка мінімізує витрати на транспортування вантажу з пунктів відправлення до пунктів перевалки;

$C_{nc-nv}$  – цільова функція, яка мінімізує витрати на транспортування вантажу з пунктів перевалки до пунктів призначення.

**Висновки.** Необхідність залучення ефективної маршрутизації, в основі якої лежить завдання скорочення експлуатаційних витрат та оптимізації основних показників роботи залізничного транспорту, спричиняє зворотній відгук від районів, що тяжіють до вивантаження, – портів. Критерії визначення пункту концентрації вантажної та комерційної

роботи дають змогу стверджувати, що пункти концентрації на дільницях і припортові райони мають спільні орієнтири в оперативній роботі.

Стратегічне планування в умовах скорочення обсягів перевезення, критичного стану інфраструктури та дефіциту інвестування спонукає до формування шляхів ефективної маршрутизації і впровадження такого підходу в припортових станціях, що спростить формування ступеневих маршрутів із зерновими вантажами і дасть

змогу скоротити час на його формування, за попередніми підрахунками, на 10-15 % і обіг вагона-зерновоза.

Інструменти для вирішення поставленого питання суттєво обмежені, тому в подальшому використання запропонованого підходу полягає в його застосуванні у складі інформаційно-керуючої системи. Прийняття рішень, зокрема в умовах роботи припортових станцій при максимумі своїх потужностей, має зважати на стан вагонного, локомотивного господарств із залученням СППР.

### Список використаних джерел

1. Проект положення про філію «Оператор припортових станцій» Акціонерного товариства «Українська залізниця». Із Києва СКЕДО НЗ-1, М, ДН регіональних філій АТ «Укрзалізниця» ЦМ, ЦРБ.
2. Lomotko D. V. Methodological Aspect of the Logistics Technologies Formation in Reforming Processes on the Railways. *Transportation Research Procedia*. 2016. Vol. 14. P. 2762-2766. ISSN 2352-1465. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.482>.
3. Арсененко Д. В., Шер І. В., Шер О. М. Впровадження СППР як проміжної ланки між сучасними реаліями та необхідністю відповідати сучасним трендам в транспортній галузі. *Тези доповідей 4-ї Міжнар. наук.-техн. конф. «Інтелектуальні транспортні технології» (Харків, 27–28 листопада 2023 р.)*. Харків: УкрДУЗТ, 2023. С. 178-179.
4. Ломотько Д. В. Формування нечіткої бази знань та системи підтримки прийняття рішення у підрозділах залізниць. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2006. № 2. С. 52-58.
5. Носко Н. А., Ломотько Д. В. Організація роботи залізничних станцій малодіяльних ділянок. *Інтелектуальні транспортні технології : тези доповідей 1-ї Міжнар. наук.-техн. конф. (24-30 січня 2020 р.)*. Трускавець; Харків : УкрДУЗТ, 2020. С. 72-73.
6. Арсененко Д. В. Удосконалення організації перевезення зернових вантажів залізничними ступінчастими маршрутами. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2019. Вип. 184. С. 92-101.
7. Арсененко Д. В. Удосконалення логістичного управління транспортуванням зернових вантажів залізничним транспортом: дис. ... канд. техн. наук. Харків: УкрДУЗТ, 2019. С. 112-115.
8. Ломотько Д. В., Сморгісь І. В., Арсененко Д. В. Формування залізничних логістичних ланцюгів постачання контейнерних вантажів на базі когнітивних технологій. *Українська залізниця*. 2018. № 9 (63). С. 11-14.
9. De Faria, Carlos Henrique F., Almeida, João Flávio F., Pinto, Luiz Ricardo. Simulation–optimization approach for sustainable planning of intermodal logistics in the Brazilian grain export industry (2024) *Decision Analytics Journal*, 10, art. no. 100388. DOI: 10.1016/j.dajour.2023.100388.

---

Арсененко Данило Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-7757-8706. Тел.: (050) 155-26-74. E-mail: [arsenenkodanil@gmail.com](mailto:arsenenkodanil@gmail.com).

---

Ломотько Денис Вікторович, доктор технічних наук, професор кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-7624-2925.

Тел.: (067) 576-06-61. E-mail: den@kart.edu.ua.

Ковальова Оксана Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною та комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-5342-0795. Тел.: (067) 252-31-85. E-mail: oksanazoom@ukr.net.

Arsenenko Danylo, PhD (Tech.). Associate Professor, department of transport systems and logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-5342-0795. E-mail: arsenenkodanil@gmail.com.

Lomotko Denis, Dr. Sc. (Tech.), professor, department of transport systems and logistics Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-5342-0795. E-mail: den@kart.edu.ua.

Kovalova Oksana, PhD (Tech.). Associate Professor, department of cargo and commercial work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-5342-0795. E-mail: oksanazoom@ukr.net.

Статтю отримано 06.05.2024 р.