

## ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

---

УДК 656.073.235(100):355.01

### ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ КОНТЕЙНЕРНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ У МІЖНАРОДНОМУ СПОЛУЧЕННІ В УМОВАХ ВІЙНИ

Кандидати техн. наук І. В. Берестов, А. В. Колісник, В. П. Раківненко, О. М. Кириченко,  
магістр Р. Р. Сведюк

### WAYS OF INCREASING THE RELIABILITY OF CONTAINER TRANSPORTATION IN INTERNATIONAL COMMUNICATION IN CONDITIONS OF WAR

PhD (Tech.) I. V. Berestov, PhD (Tech.) A. V. Kolisnyk, PhD (Tech.) O. M. Kirichenko,  
PhD (Tech.) V. P. Rakivnenko, Master's degree R. R. Sveduk

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.208.2024.308278>



**Анотація.** У статті запропонована удосконалена автоматизована технологія транспортування вантажів у контейнерах залізницею в міжнародному сполученні з урахуванням імовірності настання випадків невчасного відправлення судна з морського порту, результатом чого можуть бути додаткові витрати у вигляді штрафних санкцій. Впровадження цієї технології на АРМі оперативних працівників дасть змогу зменшити вплив «людського фактора» на прийняття рішень під час організації контейнерних перевезень залізницею та швидкого реагування за непередбаченої ситуації, що сприятиме підвищенню надійності перевезень і ймовірності їх виконання в запланований час в умовах війни.

**Ключові слова:** інтермодальні перевезення, контейнеропотік, імовірність виникнення ризику, сортувальна станція, морський порт, термінальна станція, автоматизоване робоче місце.

**Abstract.** The article proposes an improved automated technology for transporting goods by rail in international traffic, taking into account the likelihood of delays in ship departure from the seaport, resulting in additional costs in the form of penalty sanctions. It is known that the majority of goods arriving at seaports for further transportation are in containers. Therefore, in this work we consider and improve the part of the intermodal transportation route associated with raand seaports. To achieve this, it is necessary to adopt a systematic approach, which will allow describing all events occurring during the organization of such a complex process within one probabilistic framework and also consider the operation of each type of transport, especially in conditions of war where such probabilistic events become increasingly prevalent.

In this research, the objective function of the intermodal transportation system is formed when interacting with railway stations and ports as the total specific costs of container transportation, taking into account the throughput capacity of the transportation infrastructure and considering the probability of the risk of delayed ship departure due to the arrival delay of the necessary batch of containers.

Implementing this technology in automated workplaces of operational personnel will reduce the impact of the «human factor» on decision-making during the organization of rail transportation and enable quick response in an emergency, thereby enhancing the reliability of transportation and

*the probability of their execution within the planned time frame, especially in wartime conditions. The implementation of this model has shown that the cost of transporting one container to the port by container train from the terminal will reduce specific expenses by approximately 3 % compared to the existing technology. The optimal accumulation time for containers at terminal stations will be 5 and 5.6 hours respectively.*

**Keywords:** *intermodal transportation, container flow, risk probability, sorting station, sea port, terminal station, automated workplace.*

**Вступ.** Реалії сьогодення диктують нам нові вимоги щодо організації транспортного процесу доставлення вантажів у міжнародному сполученні. В умовах війни актуально врахувати такі фактори, як зменшення ризиків, диверсифікація, опрацювання альтернатив, які значно впливають на роботу транспортно-логістичного сектору, розосередження вантажних одиниць по декількох терміналах задля безпеки під час воєнного стану. Тому при удосконаленні вже наявних автоматизованих технологій перевізного процесу слід впровадити нові модулі системи підтримки прийняття рішень (СППР), які б ураховували всі вищенаведені особливості, що трапляються з вантажем під час транспортування в умовах війни. Це призведе до зменшення впливу «людського фактора» під час організації перевезень вантажів залізницею та швидкого реагування за непередбаченої ситуації, що сприятиме підвищенню надійності перевезень і ймовірності їх виконання.

**Аналіз останніх досліджень.** Аналіз наукових досліджень свідчить про те, що багато уваги науковці приділяють питанням ризиків на транспорті, тобто аналізу ймовірності настання випадків дорожньо-транспортних пригод під час транспортування вантажів або пасажирів. Так, одні автори пропонують напрям розвитку ризик-орієнтованих транспортних технологій при перевезенні вантажів, базований на логічному ланцюзі «фактор ризику – подія – економічні наслідки», фактори ризику поділити на техногенні і технологічні [1]; інші розробили класифікацію, що дає можливість

систематизувати ризики, які виникають під час вантажних перевезень автомобільним транспортом, і побудувати раціональну систему управління ризиками під час логістичної діяльності [2]; проаналізували різноманіття ризиків діяльності залізничного транспорту і запропонували ефективні методи управління ними, провели науково-обґрунтовану класифікацію ризиків, що сприяє чіткій ідентифікації кожного виду ризику в загальній системі [3]. У роботі [7] запропоновано мінімізувати витрати на транспортування контейнерів за рахунок оптимізації технології передислокації порожніх контейнерів. Визначено, вплив на загальну вартість передислокації порожніх контейнерів таких факторів, як вартість зберігання одиниці товару, оренди, репозиціонування та коливання попиту і пропозиції.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою статті є удосконалення технології транспортування вантажів у контейнерах залізницею в міжнародному сполученні з урахуванням ймовірності настання випадків невчасного відправлення судна з морського порту, результатом чого можуть бути додаткові витрати у вигляді штрафних санкцій.

Завдання дослідження:

- проаналізувати статистичні показники контейнеропотоків, що надходять у морські порти;
- проаналізувати взаємодію елементів системи інтермодальних перевезень і сформувати математичне подання функціонування системи інтермодальних перевезень;
- визначити залежності між елементами системи інтермодальних перевезень;

- сформувати математичну модель системи інтермодальних перевезень при взаємодії залізничних станцій і портів як сумарні питомі витрати транспортування контейнерів з урахуванням пропускної спроможності транспортної інфраструктури і ймовірності виникнення ризику невчасного відправлення судна внаслідок запізнення прибуття необхідної партії контейнерів.

**Основна частина дослідження.** На сьогодні найбільш «вузькими місцями», де накопичується велика кількість вантажів, що прямують у міжнародному сполученні, є залізничні термінальні станції та морські порти. Тому виникає необхідність розроблення математичної моделі технології їхньої взаємодії під час організації транспортування вантажів за кордон для удосконалення цього процесу: обрати системний підхід, який дасть змогу в одному ймовірнісному полі описати всі події, які трапляються під час організації такого складного процесу, і врахувати роботу кожного виду транспорту, причому в

умовах війни таких імовірнісних подій стає все більше.

Відомо, що основна частина вантажів, які надходять до морських портів для подальшого транспортування, знаходиться в контейнерах. Тому в цій задачі розглядаємо та удосконалюємо частину шляху інтермодальних перевезень, пов'язану з залізницею і морськими портами.

На підставі проведеного аналізу статистичних показників виявлено, що найбільший обсяг контейнеропотоків надходить у порти Дунайського регіону. У довоєнний час лідируючі позиції з перевалки контейнерів займали порти Одеського регіону (Одеса, Чорноморськ, Південний). На сьогодні задля безпеки перевезень найбільша частина вантажів проходить через порти Дунайського регіону (рис. 1). За 2023 рік через порти Ізмаїл, Рені та Усть-Дунайськ було перевалено 29,3 млн т вантажів, з них зернові – 14,1 млн т вантажів, олія – 2,6 млн т, нафтопродукти – 1,9 млн т, руда – 1,7 млн т, інші вантажі – 9 млн т [4].

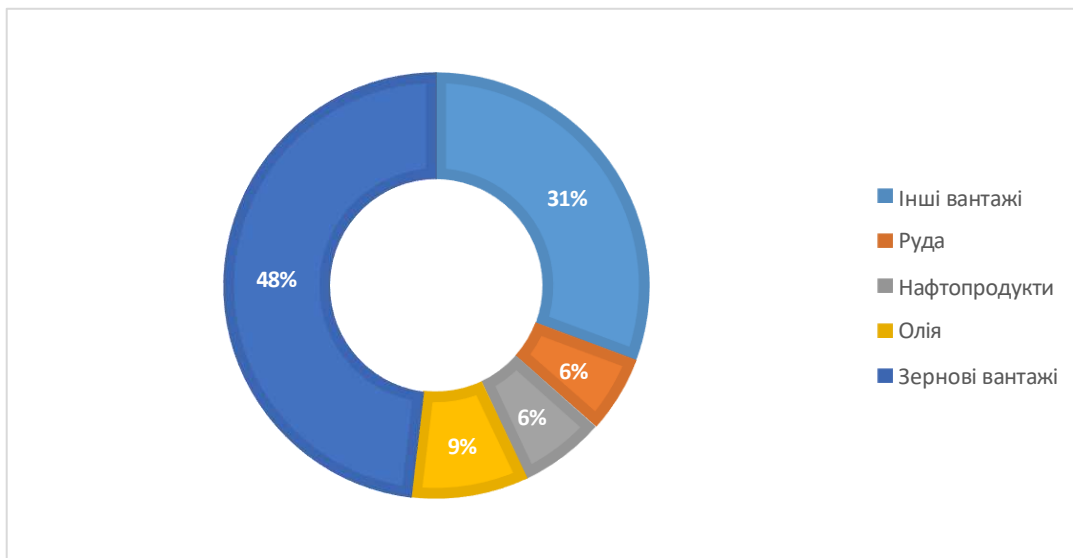


Рис. 1. Розподіл номенклатури вантажів, перевалених у портах Дунайського регіону за 2023 рік

Було проаналізовано обсяг вантажів, перевантажених у портах Дунайського регіону, за останні три роки. Статистичні дані свідчать про тенденцію збільшення обсягів з кожним роком. Так, у 2022 році

порівняно з 2021 роком збільшення на 66,21 %, у 2023 році вантажів, перевантажених у цьому регіоні, – на 51 % порівняно з обсягами 2022 року (рис. 2) [4].

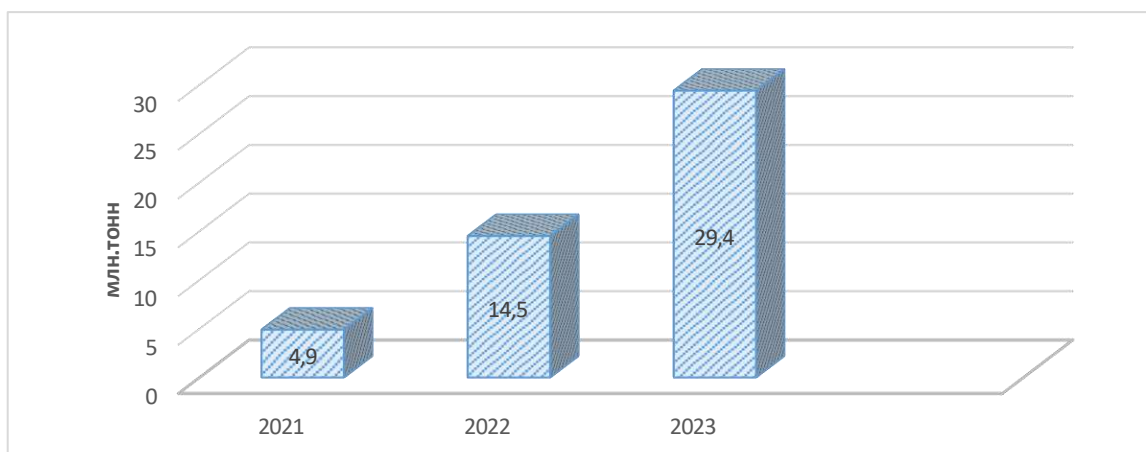


Рис. 2. Динаміка обсягів перевалених вантажів у портах Дунайського регіону за 2021-2023 роки

У цьому дослідженні інтермодальні перевезення розглядають із залученням декількох видів транспорту, а саме морського і залізничного. Тому систему інтермодальних перевезень  $S$  за участі залізничного транспорту, враховуючи базові системні принципи, можна ідентифікувати як сукупність елементів від  $e_1$  до  $e_n$ , пов'язаних між собою визначеними залежностями, з урахуванням параметрів цих елементів від  $p_1$  до  $p_n$ , відношень  $k_1$  до  $k_n$  між цими елементами.

Математичне подання функціонування системи інтермодальних перевезень необхідне для досягнення оптимального в часі і просторі потоку контейнерних перевезень між елементами системи з максимально можливою швидкістю проходження ланок. Також при формалізації такого процесу необхідно врахувати зв'язки цієї системи з навколишнім середовищем. Систему інтермодальних перевезень за участі залізничного транспорту можна подати як

$$S = (E, P, R, R^*), \quad (1)$$

де  $R^*$  – сукупність залежностей елементів системи  $E$  з елементами оточення  $E'$ .

У цьому випадку елементами системи є сортувальні станції, припортові станції, що знаходяться неподалік морського порту і обслуговують контейнеропотоки. Схема взаємозв'язку між елементами системи наведена на рис. 3.

До елементів оточення можна віднести вантажовідправників, термінальні станції, автомобільний транспорт, що доставляє вантаж від вантажовідправників до термінальних станцій.

На пропускну спроможність системи інтермодальних перевезень безпосередньо впливає переробна спроможність причалів у портах, на припортових станціях, залізничних термінальних станціях, стан транспортної інфраструктури, яка забезпечує інтермодальні перевезення (залізниці, автошляхи, контейнерні термінали). Ці елементи виступають складовими пропускну спроможності. Виходячи з цього формалізована модель системи інтермодальних перевезень при взаємодії залізничних станцій і морських портів буде виглядати так [5]:

$$S_{spr}^{int} = f(T_{spr}, I_{spr}, S_{spr}, M_{spr}), \quad (2)$$

де  $T_{spr}$ ,  $I_{spr}$ ,  $S_{spr}$ ,  $M_{spr}$  – пропускні спроможності таких підсистем, як термінальна станція, транспортна

інфраструктура, сортувальна станція, переробна спроможність морського порту.

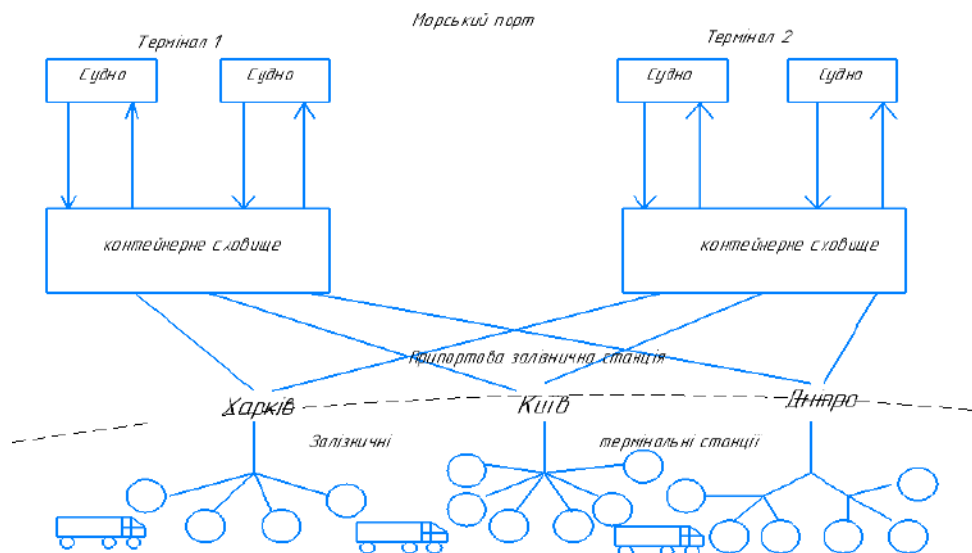


Рис. 3. Схематичне подання взаємодії елементів системи інтермодальних перевезень при моделюванні цього процесу

Ці підсистеми взаємозалежні, що ускладнює процес формалізації та удосконалення інтермодальних перевезень. Кожен із цих елементів має фактори випадковості, які потрібно врахувати під час побудови моделі інтермодальних перевезень. Іншими словами, кожен підсистему можна вважати змінною ( $Z$ ). Ці змінні залежать одна від одної та від факторів зовнішнього середовища:

$$Z = f(Y, \mu, X), \quad (3)$$

де  $\mu = \{\mu_1 \dots \mu_n\}$  - множина залежних  $n$  змінних, таких як витрати на доставлення контейнерних партій, часові характеристики;

$X = \{x_1, x_2 \dots x_m\}$  - множина незалежних  $m$  змінних, кількість ресурсів за певних параметрів потоку замовлень;

$Y$  - множина параметрів моделі.

Надходження контейнерів можна вважати випадковим транспортним потоком, який зароджується з потоків вантажовідправників. При формалізації системи інтермодальних перевезень необхідно врахувати певні умови [5]:

$$0 \leq Q \leq \left\{ \begin{array}{l} D, D \leq S_{spr}^{int} \\ S_{spr}^{int}, D \leq S_{spr}^{int} \end{array} \right\}, \quad (4)$$

де  $Q$  – контейнеропотік;

$S_{spr}^{int}$  – пропускна спроможність системи інтермодальних перевезень.

Пропонуємо прийняти, що контейнеропотік, який проходить через систему інтермодальних перевезень, не має перевищувати попит на перевезення. У разі перевищення значення попиту за пропускну

спроможність системи інтермодальних перевезень контейнеропотік не має бути більше пропускної спроможності системи інтермодальних перевезень.

Також, урахуваючи випадковий характер зародження контейнеропотоків, за формалізації системи інтермодальних

перевезень використаємо модель кількісного оцінювання надходження контейнерів до залізничних термінальних станцій із одночасним контролюванням імовірнісних характеристик цього процесу. Отже, із урахуванням отриманих вище моделей, визначимо функціонал [6, 8]:

$$U = U(p, \tau, \{\lambda_1(t), \lambda_2, \dots, \lambda_{n^c}(t)\}, \{q_1, q_2, \dots, q_{n^c}\}), \quad (5)$$

де  $U$  – функціонал, який визначає мінімальну кількість контейнерів, що з імовірністю  $p$  будуть накопичені на залізничних термінальних станціях протягом часового інтервалу  $\tau$  із урахуванням множини функцій інтенсивностей  $\{\lambda_1(t), \lambda_2(t), \dots, \lambda_{n^c}(t)\}$  і множини величин кратностей  $\{q_1, q_2, \dots, q_{n^c}\}$  складових потоків;  
 $n^c$  – кількість складових потоків.

Виходячи з вищевказаного цільова функція системи інтермодальних перевезень при взаємодії залізничних станцій і портів буде виглядати як сумарні питомі витрати транспортування контейнерів із урахуванням пропускної спроможності транспортної інфраструктури і ймовірності виникнення ризику невчасного відправлення судна внаслідок запізнення прибуття необхідної партії контейнерів:

$$V(\tau) = \frac{1}{\sum_{i=1}^z Q} \sum_{i=1}^z (N + \Pi + T + C + P \cdot S) \rightarrow \min, \quad (6)$$

де  $Q$  – контейнеропотік із урахування накопичень контейнерів за декількома напрямками;

$z$  – кількість маршрутів доставлення контейнерів до порту;

$\tau$  – змінний вектор часу закінчення накопичення контейнерних партій  $\tau = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_z)$  на залізничних термінальних станціях маршрутів;

$N$  – витрати на накопичення контейнерів, пов'язані з контейнеро-годинами,

$$N = e_{\kappa z} \int_{t_0}^{\tau_i} U dt, \quad (7)$$

де  $e_{\kappa z}$  – вартість контейнеро-години;

$\Pi$  – витрати на переміщення контейнерних партій, пов'язані з вагоно-кілометрами,

$$\Pi = e_{\sigma-\kappa m} * l_i(U), \quad (8)$$

де  $l_i$  – довжина  $i$ -го маршруту від термінальної станції до порту;

$e_{\sigma-\kappa m}$  – вартість вагоно-кілометра;

$T$  – витрати, пов'язані з поїздо-годинами в русі під час транспортування контейнерних партій за певний час у русі  $t_i$ ,

$$T = e_{n-z} * t_i ; \quad (9)$$

$C$  – витрати, пов’язані з вагоно- та контейнеро-годинами, які виникають під

час руху поїздів по дільницях, під час невикористаного простоя вагонів і в процесі їхньої обробки на сортувальних станціях, а також просування поїздів від припортових станцій до порту,

$$C = \left( e_{k-z} \cdot Q \right) + e_{\rho_i} \frac{1}{\rho_i} Q \times \left( O_{sort} + K \right), \quad (10)$$

де  $\rho_i$  – місткість фітінгової платформи в контейнерах на  $i$ -му маршруті (залежить від типів фітінгових платформ і контейнерів, що використовують);

$O_{sort}$  – час переробки поїзда на сортувальній станції, який підпорядковується нормальному закону розподілу;

$K$  – час просування поїздів від припортової станції до порту, який підпорядковується розподілу Ерланга;

$S$  – витрати, пов’язані з невикористанним простоем судна і штрафними санкціями, які виникають внаслідок невчасного прибуття контейнерних партій;

$P$  – імовірність виникнення ризику невчасного відправлення судна внаслідок запізнення прибуття необхідної партії контейнерів.

Оптимізацію моделі слід проводити з урахуванням таких обмежень:

$$\left\{ \begin{array}{l} z \\ 0 \leq \sum_{i=1}^z Q \leq \left\{ \begin{array}{l} D, D \leq S_{spr}^{int} \\ S_{spr}^{int}, D > S_{spr}^{int} \end{array} \right\} \\ \tau_i \geq 0, \forall_j = 1, 2, \dots, z \\ Q \leq m_j^{max}, \forall_j = 1, 2, \dots, z \end{array} \right. , \quad (11)$$

де  $m_j$  – максимально допустима кількість фітінгових платформ у складі поїзда на  $i$ -му маршруті;

$S_{spr}^{int}$  – пропускна спроможність системи інтермодальних перевезень.

Перше обмеження забезпечує контейнеропотік з усіх напрямків, який не перевищує пропускну спроможність системи інтермодальних перевезень. Друге обмеження показує забезпечення умови невід’ємності часу завершення накопичення контейнерних партій. Третє обмеження необхідно для запобігання накопиченню контейнерів у кількості, яка перевищує максимально допустимий склад поїзда.

При розв’язанні цієї задачі було розглянуто дві залізничні термінальні станції, на які надходили контейнери від вантажовідправників. Реалізація такої моделі показала, що вартість транспортування одного контейнера до порту контейнерним потягом з термінала зменшить питомі витрати приблизно на 3 % порівняно з чинною технологією. Оптимальне закінчення часу накопичення контейнерів на термінальних станціях складе 5 і 5,6 год відповідно.

Запропонована технологія дає змогу зменшити ймовірність виникнення ризику невчасного відправлення судна внаслідок запізнення прибуття необхідної партії контейнерів, тим самим уникнути витрат, пов’язаних із невикористанним простоем судна і штрафними санкціями, які виникають внаслідок невчасного прибуття контейнерних партій.

**Висновки.** У роботі проведено аналіз статистичних показників контейнеропотоків, що надходять у морські порти.

Виявлено, що найбільший обсяг контейнеропотоків припадає на порти Дунайського регіону. У довоєнний час лідируючі позиції з перевалки контейнерів займали порти Одеського регіону (Одеса, Чорноморськ, Південний). На сьогодні задля безпеки перевезень найбільша частина вантажів проходять через порти Дунайського регіону. Як полігон досліджень було обрано дві залізничні термінальні станції, розташовані на території України, із яких відправляють контейнерні поїзди в порти Дунайського регіону.

Було проаналізовано взаємодію елементів системи інтермодальних перевезень і сформовано математичне подання функціонування системи інтермодальних перевезень. Сформовано математичну модель системи інтермодальних перевезень при взаємодії

залізничних станцій і портів як сумарні питомі витрати на транспортування контейнерів із урахуванням пропускної спроможності транспортної інфраструктури і ймовірності виникнення ризику невчасного відправлення судна внаслідок запізнення прибуття необхідної партії контейнерів. Розв'язання цієї задачі показало, що використання запропонованої технології дасть змогу зменшити вартість на транспортування контейнера залізницею в системі інтермодальних перевезень у бік морського порту приблизно на 3 %. Впровадження такої автоматизованої технології сприятиме узгодженій роботі між усіма учасниками перевізного процесу та уникненню витрат, пов'язаних із невиробничим простоем судна і штрафними санкціями, які виникають внаслідок невчасного прибуття контейнерних партій до порту.

#### Список використаних джерел

1. Бутько Т. В., Пархоменко Л. О., Артемов Е. М., Лагно О. С. Методи організації вантажних залізничних перевезень на основі ризикорієнтованих технологій. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 4. С. 38-45.
2. Тарельник Н. В. Класифікація ризиків під час вантажних перевезень автомобільним транспортом. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. № 4. С. 92-98.
3. Віштак І. В., Березюк О. В. Причини виникнення ризиків на автомобільному транспорті. *XV Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту»*. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/12/36.pdf>.
4. У портах Дунайського кластеру відкрили 23 нових термінали з початку року. URL: <https://forbes.ua/news/v-portakh-dunayskogo-klasteru-vidkrito-23-novikh-terminali-tsogo-roku-13122023-17888>.
5. Алексійчук Н. М. Удосконалення технологічного забезпечення контейнерних перевезень з використанням резервів провізних спроможностей залізничного транспорту: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01. Київ, 2013. 24 с.
6. Колісник А. В. Формування автоматизованої технології транспортування контейнерів залізницею на основі теорії випадкових потоків: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 – транспортні системи; 27–Транспорт. Харків, 2020. 225 с.
7. Research on the Optimization of Empty Container Repositioning of China Railway Express in Cooperation with International Liner Companies. URL: Sustainability | Free Full-Text | Research on the Optimization of Empty Container Repositioning of China Railway Express in Cooperation with International Liner Companies (mdpi.com).



8. Research of process of receipt of container flows at railway terminal stations in the conditions of intermodal transportations / M. Kutsenko, A. Kolisnyk, O. Kameniev та ін. *AIP Conference Proceedings*. 2684, 020006 (2023). 2023. URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2684/1/020006/2893741/Research-of-process-of-receipt-of-container-flows?redirectedFrom=fulltext>.

---

Берестов Ігор В'ячеславович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID [0000-0002-1209-6885].

E-mail: berestov@kart.edu.ua.

Кириченко Олександр Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки, Національна академія Національної гвардії України. ORCID ID [0000-0001-9136-7593].

E-mail: Akirichenko987@gmail.com.

Раківненко Валерія Павлівна, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інженерної механіки, Національна академія Національної гвардії України. ORCID ID [0000-0002-6136-6191].

E-mail: Valeryrakivnenko@gmail.com.

Колісник Аліна Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID [0000-0001-5038-0230].

Tel.: 093-734-41-20. E-mail: kolisnuk@kart.edu.ua.

Сведюк Роман Романович, магістр, Український державний університет залізничного транспорту.

Berestov Igor, PhD (Tech.), Associate Professor, department of railway stations and units, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID [0000-0002-1209-6885]. E-mail: berestov@kart.edu.ua.

Kirichenko Oleksandr, PhD (Tech.), Associate Professor, department of Engineering Mechanics, National Academy of the National Guard of Ukraine. ORCID ID [0000-0001-9136-7593]. E-mail: akirichenko987@gmail.com.

Rakivnenko Valeriya PhD (Tech.), Associate Professor, head of the department of Engineering Mechanics, National Academy of the National Guard of Ukraine. ORCID ID [0000-0002-6136-6191].

E-mail: valeryrakivnenko@gmail.com.

Kolisnyk Alina, PhD (Tech.), Associate Professor, department of railway stations and units, Ukrainian State University of Railway Transport., ORCID ID [0000-0001-5038-0230]. tel.: 093-734-41-20. E-mail: kolisnuk@kart.edu.ua.

Sveduk Roman, master's degree, Ukrainian State University of Railway Transport.

Статтю прийнято 25.04.2024 р.