

УДК 656.223:656.012

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ ВАНТАЖІВ  
ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПЛЕКСНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЇХ ОБРОБКИ  
НА КОНТЕЙНЕРНОМУ ХАБІ**

Асп. О. О. Нестеренко

**IMPROVEMENT OF CARGO ROUTING TECHNOLOGY AT A CONTAINER HUB  
USING A COMPREHENSIVE MATHEMATICAL MODEL**

Postgraduate student O. O. Nesterenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.215.2026.358845>



*Анотація.* Створення нового способу завантаження в контейнер потребує комплексного підходу, поєднання існуючих технологій з інноваціями та адаптації до логістичних вимог. Важливо враховувати не тільки ефективність використання простору, але і безпеку, швидкість завантаження і можливість використання методу для різних видів

ISSN (p) 1994-7852  
ISSN (online) 2413-3795  
© Нестеренко О. О., 2026.

вантажів і контейнерних типів перевезень. Інноваційні пакувальні рішення для завантаження контейнерів відіграють головну роль у підвищенні ефективності логістики, зниженні транспортних витрат і підвищенні безпеки транспорту.

Стаття присвячена актуальній проблемі підвищення ефективності роботи контейнерних хабів як основних елементів сучасних логістичних ланцюгів. Метою дослідження є вдосконалення технології маршрутизації вантажопотоків через розроблення та впровадження комплексної математичної моделі. Об'єктом дослідження є технологічні процеси обробки та розподілу контейнеропотоків.

У період з лютого 2022 року інфраструктура України зазнала критичних втрат, багато шляхів, мостів і складських приміщень було зруйновано, що значно знижує швидкість логістики. Тому дослідження в цьому напрямі проводять достатньо активно. У роботі проаналізовано існуючі підходи щодо управління вантажопотоками та виявлено їх обмеження в умовах стохастичного попиту.

Дослідження зосереджено на вирішенні завдання оптимізації маршрутизації вантажів на території контейнерного хабу. Робота базована на розробленні комплексної математичної моделі, заснованої на методах лінійного програмування і теорії масового обслуговування. Ця модель формалізує взаємозв'язки між вхідними вантажопотоками, внутрішньотермінальною логістикою та зовнішніми транспортними комунікаціями. Запропонована модель дає змогу оптимізувати процеси розподілу контейнерів з урахуванням обмежень пропускної спроможності хабу, часових вікон доставлення та наявних ресурсів.

Теоретично обґрунтовано, що практична реалізація розробленої технології забезпечує мінімізацію сукупних логістичних витрат і скорочення часу обробки вантажів на терміналі. Результати моделювання підтверджують доцільність використання запропонованого підходу для ухвалення оперативних рішень.

**Ключові слова:** контейнерний хаб, маршрутизація вантажів, математичне моделювання, логістика, оптимізація вантажопотоку, мультимодальні перевезення.

**Abstract.** Developing a new container loading method requires a comprehensive approach, combining existing technologies with innovations, and adapting to logistical requirements. It is essential to consider not only space utilization efficiency but also safety, loading speed, and the applicability of the method to various types of cargo and containerized transport. Innovative packaging solutions for container loading play a key role in enhancing logistics efficiency, reducing transportation costs, and improving transport safety.

The paper addresses the urgent issue of enhancing the efficiency of container hubs as key elements of modern logistics chains. The aim of the study is to improve cargo flow routing technology through the development and implementation of a complex mathematical model. The object of the research is the technological processes of processing and distributing container flows.

Since February 2022, Ukraine's infrastructure has suffered critical losses; numerous roads, bridges, and storage facilities have been destroyed, significantly impeding logistical speed. Consequently, research in this area is being conducted with great intensity. The paper analyzes existing approaches to cargo flow management and identifies their limitations under conditions of stochastic demand.

The study focuses on solving the problem of optimizing cargo routing within the container hub territory. The work is based on the development of a complex mathematical model grounded in linear programming methods and queuing theory. This model formalizes the interconnections between incoming cargo flows, internal terminal logistics, and external transport communications. The proposed model enables the optimization of container distribution processes, taking into account hub throughput capacity limitations, delivery time windows, and available resources.

*Theoretically, it is substantiated that the practical implementation of the developed technology ensures the minimization of total logistics costs and a reduction in cargo processing time at the terminal. The modeling results confirm the feasibility of using the proposed approach for operational decision-making.*

**Keywords:** *container hub, cargo routing, mathematical modeling, logistics, optimization, cargo flow, multimodal transport.*

**Вступ.** Розвиток залізничних перевезень в останні роки зумовлений воєнним станом у країні, але з теперішньою тенденцією мирних переговорів, у яких відбувається «значний прогрес» [1], розвитком і дослідженням шляхів, методів, удосконаленням логістичних операцій із вантажами і технологією доставлення вантажів, перспективним зростанням потоку для відновлення нашої країни, формуванням транспортно-експедиторської діяльності на території нашої країни, підготовки в роботі з підвищеним вантажопотоком.

Одне тільки розблокування морських шляхів, авіасполучення покладе на транспортну систему України величезне навантаження, до якого необхідно підготуватися завчасно.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Таке питання зараз є одним із найактуальніших у середовищі українських науковців-економістів і фахівців із транспорту у світі, інфраструктура логістики в Україні не відповідає потребам країни як транспортної, так і складської інфраструктури. Під час війни багато шляхів, мостів і складських приміщень було зруйновано, що значно знижує швидкість логістики [2]. Тому дослідження в цьому напрямі проводять достатньо активно. Дослідження більшості науковців нашого часу спрямовані на аналіз та євроінтеграцію залізничного транспорту і розвиток транскордонного співробітництва залізниць [3]. Провідні науковці країни пропонують використовувати різні методи. Так, у дослідженнях Лариси Пархоменко, Тетяни Бутько, Віктора Прохорова значну увагу приділено проблемам планування перевезень в умовах стохастичної оптимізації технологічних процесів [7] – знаходити

ефективні рішення навіть за умов неповної інформації про входні параметри потоку. Такий підхід є особливо актуальним для завдань маршрутизації дрібних партій вантажів і може варіюватися залежно від нерівномірності надходження замовлень і партій на термінал. Питання оптимізації ефективності впровадження сучасних логістичних технологій і розповсюдження «зеленої» логістики розглядають Денис Ломотько, Олександр Огар, Дмитро Козодой у роботі [8] – аналіз ефективності впровадження сучасних логістичних технологій (включаючи концепцію «зеленої» логістики). Автори доводять, що оптимізація взаємодії різних видів транспорту на терміналах є критичним фактором для зменшення загальних витрат. Отримані результати підтверджують необхідність удосконалення технології маршрутизації на етапі «останньої милі» або з розподілом вантажопотоків із контейнерних хабів, що забезпечує синергетичний ефект для всієї транспортної системи.

Дослідження літературних джерел свідчать про глибоке опрацювання питань мультимодальної взаємодії та методів оптимізації в умовах невизначеності. Проте завдання визначення оптимальних маршрутів вивезення палетованих вантажів з урахуванням стохастичного характеру їх надходження на контейнерний хаб потребує подальшого дослідження.

Закордонні дослідники свою увагу змістили від простих евристик до гібридних алгоритмів, використання машинного навчання (Deep Reinforcement Learning) і врахування реалістичних фізичних обмежень (стабільність вантажу, навантаження на вісь, крихкість, цінність). Напрями оптимізації завантаження

контейнерів у контексті залізничних і автомобільних перевезень є особливо важливими, бо враховують не лише об'єми, а й вагові обмеження та центрування. Основні питання, які розглядають автори роботи [4] для визначення пріоритету завантаження простору контейнера, – це конфлікт інтересів із пріоритетності під час завантаження контейнера, і вони пропонують математичну модель, щоб дійти компромісу між двома суперечливими вимогами щодо завантаження. У роботі [5] автори розглядають оптимізацію завантаження з урахуванням навантаження на вісь, бувають моменти, коли завантаження контейнера відбувається з обмеженнями за об'ємом чи вагою, але їхня модель доволі добре адаптована під залізничні перевезення, де контроль навантаження на вісь є важливою складовою безпеки перевезень.

Колеги-науковці з сусідніх країн у Європі теж дуже активно досліджують питання утилізації вантажів. Так, польська школа логістики розглядає це питання як енергетичний фактор, у дослідженні [9] доводять, що правильне формування палет на терміналі впливає не тільки на швидкість, а й енергоефективність всього маршруту, а технічні параметри терміналів є визначальними для вибору маршрутів розподілу вантажопотоків. Це підтверджує необхідність урахування пропускнуої спроможності складських зон для розроблення моделі маршрутизації палетованих вантажів.

У сучасних європейських дослідженнях, зокрема в роботі [10], описано підхід, що дає змогу оптимізувати маршрути від контейнерних хабів навіть за величезної кількості дрібних замовлень. Для вирішення завдання маршрутизації вивезення палетованих вантажів із терміналу критично важливим є врахування характеру їх надходження, класичні статичні моделі маршрутизації втрачають ефективність із високою динамікою замовлень. Автори пропонують підхід за

стохастичної оптимізації на основі Deep Reinforcement Learning (DRL) — глибоке навчання з підкріпленням для великомасштабних систем, що допомагає адаптувати маршрути в реальному часі. Цей досвід доцільно імплементувати для розроблення або удосконалення технології роботи вітчизняних контейнерних хабів.

У сучасних наукових дослідженнях домінуючим є підхід щодо розгляду контейнерного хабу як елемента дворівневої системи розподілу. Зокрема, у фундаментальній роботі канадських вчених [11] розроблено модель сервісної мережі, яка синхронізує прибуття магістрального транспорту з графіками розвезення на «останній милі». Автори доводять, що ігнорування часових обмежень (Time Windows) на етапі перевантаження призводить до зниження ефективності всієї системи, а також зниження стійкості в період пікових навантажень.

На особливу увагу заслуговують підходи американської наукової школи щодо управління динамічними системами розподілу. У роботі [12] досліджено проблему маршрутизації з жорсткими часовими дедлайнами. Запропоновано математичну модель, яка дає змогу балансувати між ефективністю завантаження транспортних засобів і дотриманням критичних часових вікон. Цей підхід є дуже важливим для технології роботи контейнерного хабу, коли затримка вивезення палетованих партій може призвести до блокування складських потужностей.

Технологія роботи сучасного контейнерного хабу тісно пов'язана з концепцією крос-докінгу (Cross-Docking), коли вантажі перевантажують із магістрального транспорту на автомобілі доставлення з мінімальним часом зберігання. Вагомий внесок у моделювання цих процесів зробив американський дослідник M. Dulebenets у дослідженні [13], запропонувавши адаптивний алгоритм планування роботи терміналу в умовах невизначеності часу обслуговування:

вхідний потік синхронізований із вихідним, минаючи довге зберігання. Автор доводить, що ігнорування випадкового характеру тривалості вантажних операцій із розформуванням партій призводить до значних черг і простоїв транспорту. Цей висновок підтверджує необхідність використання стохастичних підходів для розроблення технології маршрутизації палетованих вантажів на вітчизняних терміналах.

У роботі [14] в основі підходу математичної моделі укомплектування контейнера лежить модифікована задача 3D-BPP (3D Bin Packing Problem). Автори відмовляються від класичного лінійного програмування (MILP) на користь гібридної евристики, оскільки для реального хабу точні методи надто повільні. Змодельовано процес завантаження хабу не як хаотичне наповнення об'єму, а як структуроване розміщення блоків із використанням методу максимальних просторів.

У роботі [15] на прикладі реального кейсу логістичної компанії продемонстровано ефективність застосування методів цілочисельного лінійного програмування (ILP) для задачі палетизації. Дослідники довели, що математичне моделювання допомагає підвищити коефіцієнт завантаження контейнера до 95 % порівняно з ручним плануванням.

Однак ця робота сфокусована виключно на геометричному розміщенні (мінімізація порожнього простору). У нашому дослідженні розширено цей підхід, інтегруючи етап палетизації в комплексну модель маршрутизації, де критерієм оптимальності є не лише об'єм, а і допуски для вітчизняних залізничних перевезень.

Суттєвим недоліком існуючих систем управління вантажопотоками на контейнерних хабах є розрив між логічним плануванням маршрутів і фізичними процесами завантаження. Як зазначають дослідники в роботі [16], ігнорування взаємозалежності цих процесів призводить до субоптимальних рішень, коли

теоретично ефективний маршрут стає неможливим для реалізації через порушення обмежень стабільності або черговості вивантаження (LIFO). Впровадження технології, де параметри утилізації простору динамічно корегують маршрут, є критично необхідним для підвищення надійності ланцюга постачань.

Щодо методології, то дослідження демонструють еволюцію від простого «пакування ящиків» до «інтегрованої логістики». Одним із початкових етапів логістичного транспортного ланцюга можна вважати правильне використання внутрішнього простору контейнера, якщо конструкція контейнера такий простір передбачає, а саме його оптимізацію [6], принцип утилізації контейнерного простору розглядають як екологічний фактор «Green Logistics» із зменшенням викидів CO<sub>2</sub>.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Актуальність дослідження визначена необхідністю розв'язання складної задачі оптимізації в умовах стохастичного попиту: досягнення максимального чистого прибутку ( $\Pi$ ) за одночасної мінімізації ризиків і максимізації відповідності договірним зобов'язанням (Service Level Agreement, SLA).

Метою дослідження є удосконалення технології маршрутизації вантажів для їх обробки на контейнерному хабі через використання порівняльного аналізу фінансової ефективності чотирьох стратегій маршрутизації: FIFO, оптимізована (Хаби), гібридна (SLA+Хаби) і RL Agent Heuristics. Модель використовує статистичну валідацію на основі 95 % довірчих інтервалів із метою забезпечення надійності висновків в умовах стохастичного попиту.

Завданням дослідження є покращення ефективності маршрутизації контейнерних вантажів і удосконалення технології ухвалення рішень на основі точних чисел у результаті математичного прогнозування з урахуванням можливого порушення оптимальної логіки пакування хабів (Destination Logic Violation) і класів

пакування SC (Stack Class Logic Violation), можливості балансування між відсотком утилізації контейнера і штрафом за перепростій контейнера та прогнозування ризиків.

**Основна частина дослідження.** У сучасних глобальних логістичних мережах ефективна маршрутизація вантажів на контейнерних хабах є критичним фактором, що визначає конкурентоспроможність і рентабельність операторів. Це завдання є багатофакторною задачею оптимізації, яка вимагає балансу між мінімізацією операційних витрат і максимізацією задоволеності клієнтів, вираженою через дотримання угоди про рівень обслуговування SLA.

Численні дослідження зосереджені або на класичних евристичних (наприклад FIFO), які часто призводять до високих штрафів SLA через ігнорування термінів, або на жорсткій логістичній оптимізації (максимізація утилізації), що підвищує ризик накопичення критичного вантажу.

Модель являє собою дискретно-подієве симулювання (DES), яке імітує потік палет ( $p_i$ ) через контейнерний хаб. Кожна палета має основні атрибути, такі як вага, об'єм, критичний термін SLA ( $D_{SLA}$ ) і клас штабелювання ( $SC \in \{1,2,3\}$ ).

Основна ідея моделювання полягає в порівнянні того, як різні стратегії управління чергою та ухвалення рішень про відправлення контейнера впливають на інтегрований фінансовий показник чистого прибутку ( $\Pi$ ).

Логістичні обмеження: рішення про пакування палети в контейнер ( $c_j$ ) суворо підпорядковане фізичним обмеженням (вага, об'єм) і критичному правилу штабелювання SC (більш крихкий вантаж не може бути розміщений під міцнішим). Це моделює реальні ризики пошкодження.

Фінансовий облік: операційну ефективність вимірюють через вартість контейнерних операцій ( $Cost_{Oper}$ ), яка включає витрати на перевантаження ( $Cost_{Reh}$ ). Цей показник розраховують на основі ефективності послідовності (SeqEff) — штрафу за порушення логіки розвантаження за хабами та SC.

Скорочення зведено в табл. 1 адаптивне рішення (RL Agent): стратегія RL Agent використовує евристичну оцінку цінності Дії  $Q_{Ship}(S)$ , яка є зваженою функцією поточного стану системи ( $S$ ). Агент відправляє контейнер, коли  $Q_{Ship}(S)$  перевищує критичний поріг  $\Theta$ , активно балансує між високою утилізацією ( $S_1$ ) і мінімізацією ризику штрафів SLA ( $S_3$ ), і переповнення хабу ( $S_6$ ).

Валідація: для усунення стохастичної похибки використовують багаторазовий прогін ( $N \geq 30$ ) і аналіз 95 % довірчих інтервалів (CI) для статистичного підтвердження переваги стратегії з найвищим  $\Pi$ .

Основний потік вантажів розглядають із завантаженням у палети (табл. 2). Палета є базовою одиницею вантажу, що генерована в системі, тому доцільно буде провести детальний опис палети ( $p_i$ ).

Таблиця 1

Перелік скорочень

Скорочення	Повне найменування	Пояснення
RL Agent	Reinforcement Learning Agent	Емпіричний агент, що використовує зважену евристику для ухвалення стратегічних рішень про відправлення
SC	Stack Class	Клас штабелювання. Характеристика міцності вантажу (1 – найміцніший, 3 – найкрихкіший)
SeqEff	Sequence Efficiency	Ефективність послідовності завантаження контейнера
$\Pi$	Чистий Прибуток	Фінансовий показник ефективності

Таблиця 2

## Детальний опис палети, контейнера, параметри хабу

Детальний опис палети			
Позначення	Складова	Одиниця	Деталізація та Пояснення
1	2	3	4
$W_j, V_j$	Вага та об'єм палети	кг, м <sup>3</sup>	Фізичні параметри і-ї палети
$SC_i$	Клас штабелювання (Stack Class)	{1,2,3}	Визначає обмеження: на крихкий вантаж не можна ставити міцний
$t_{arr,i}$	Час надходження (Arrival Time)	год	Година, коли палета надійшла на склад хабу
$D_{SLA,i}$	Критичний термін SLA (Deadline)	год	Максимально допустимий час відправлення: $D_{SLA,i} = t_{arr,i} + SLA_{max}$
$Rev_i$	Дохід на палету (Revenue)	дол.	Фіксований дохід, який дає палета з успішним відправленням
$Dest_j$	Пункт призначення	-	Кінцевий хаб або місто
формальний опис контейнера( $c_j$ )			
$MaxW_j, Max_j$	Максимальна вага та об'єм	кг, М <sup>3</sup>	Жорсткі обмеження контейнера
$MinFill_j$	Мінімальна утилізація	%	Мінімально допустимий поріг Util для відправлення
$Util_c$	Утилізація (Utilization)	%	Фактична утилізація
$T_{wait,c}$	Час простою контейнера	год	Час очікування від першої завантаженої палети до відправлення
параметри хабу			
$N_{MaxHub}$	Максимальна місткість хабу	шт.	Жорстке фізичне обмеження складу
$N_{st,t}$	Кількість палет на складі	шт.	Фактична кількість палет у системі в час $t$

Наступним етапом з утилізації контейнерного простору буде визначення розміщення та штабелювання палет. Це основний набір правил для фізичного розміщення палет у контейнері. Правило:

палету з меншим числовим значенням SC (більш міцна) можна ставити під палету з більшим числовим значенням SC (більш крихку), але не навпаки (табл. 3).

Таблиця 3

## Класи штабелювання вантажів

Клас (SC)	Числове значення	Маркування	Опис міцності	Обмеження штабелювання
1	2	3	4	5
Міцний	1	Стійкий	Максимальна структурна цілісність. Може витримувати значний тиск	Може бути завантажений під будь-який інший SC(1,2,3)

Продовження табл. 3

1	2	3	4	5
Середній	2	Умовне штабелювання	Помірна міцність. Припустиме невелике вертикальне навантаження	Може бути завантажений під SC 2 або SC 3. Не може бути під SC 1
Крихкий	3	Не штабелювати	Крихкий вантаж, не призначений для штабелювання або витримує мінімальне навантаження	Може бути завантажений лише під SC 3 (тобто лише такий самий крихкий вантаж)

Визначившись з основними моделями об'єктів завантаження, об'єкта, у який завантажують, і місця, де відбуваються операції з завантаження, моделюють вхідний потік і витрати зберігання.

Генерацію стохастичного попиту, потік надходження палет  $N_t$  у годину  $t$  моделюють як випадковий процес:

$$N_t = \text{Uniform}(\min N, \max N) \cdot M_{\text{seas}} \cdot (1 + \text{Gaussian}(0, \sigma_{\text{vol}})) \quad (1)$$

Ця формула забезпечує реалістичну волатильність попиту. Вона бере базове навантаження (Uniform), корегує його на прогнозовану сезонність ( $M_{\text{seas}}$ ) і додає непередбачувану волатильність (Gaussian), що імітує щоденні ринкові коливання. Це

дає змогу створювати навантаження, яке є не лише випадковим, але і структурно схожим на реальні логістичні дані.

Облік витрат на зберігання ( $\text{Cost}_{\text{Storage}}$ ):

$$\text{Cost}_{\text{Storage}} = \sum_{t=1}^T [N_{st,t} \cdot \text{Rate}_{\text{Stor}}] + \sum_{t=1}^T [\max(0, N_{st,t} - N_{\text{MaxHub}}) \cdot \text{Rate}_{\text{Over}}] \quad (2)$$

Модель інтегрує механізми прогнозування (Forecasting):

- макро-прогнозування:  $M_{\text{seas}}$  та  $\sigma_{\text{vol}}$  – довгострокове планування та оцінювання ризику;

- мікро-прогнозування: прогнозування надходження палет ( $\hat{N}_{t+1}$ ) використовують для неявного оцінювання

майбутнього тиску на хаб (базовано на ковзному середньому).

Наступним важливим етапом є логіка пакування та ефективність послідовності, обмеження пакування. Палета  $p_i$  може бути завантажена в контейнер  $c_j$  (подія Pack), якщо

$$\text{Pack}(p_i, c_j) \Leftrightarrow \left( \sum_{k \in c_j} W_k + W_i \leq \text{Max}W_j \right) \wedge \left( \sum_{k \in c_j} V_k + V_i \leq \text{Max}V_j \right) \wedge \left( SC_i \geq \min_{k \in c_j} (SC_k) \right) \quad (3)$$

Логіка суті обмежень, полягає в тому, що обмеження за вагою та об'ємом ( $\sum W \leq \text{Max}_j$ )  $\wedge$  ( $\sum V \leq \text{Max}_j$ ). Ці обмеження забезпечують фізичну можливість розміщення вантажу в контейнері відповідно до його вантажопідйомності та кубатури; обмеження за класом штабелювання (SC) ( $SC_i \geq \min_{k \in C_j} (SC_k)$ ).

Це найважливіше логістичне обмеження, що запобігає пошкодженню вантажу: нова палета  $p_i$  може бути завантажена, тільки якщо вона має міцність (SC) таку саму або вищу за найкрихітшу палету, що вже знаходиться в контейнері.

Розрахунок ефективності послідовності (SeqEff) RehandlingOps:

$$\text{RehandlingOps}_c = \underbrace{\max(0, \Delta\text{Hub} - (N_{\text{Hubs}} - 1))}_{\text{Порушення логіки Хабів}} + \underbrace{\sum_{i=1}^{N_c-1} \mathbb{I}(\text{Dest}_i \neq \text{Dest}_{i+1} \wedge SC_i < SC_{i+1})}_{\text{Порушення логіки SC}}, \quad (4)$$

де  $\Delta\text{Hub}$  – це кількість унікальних хабів призначення, які зустрічають у завантаженому контейнері.

Ефективність послідовності (SeqEff) вимірюють через кількість необхідних операцій перевантаження (Rehandling Ops<sub>c</sub>) для розвантаження контейнера в кінцевому ланцюжку хабів без пошкодження вантажу. Чим нижча кількість RehandlingOps<sub>c</sub>, тим вища ефективність SeqEff. Це критичний показник, оскільки кожна операція перевантаження (rehandling) додає час, трудові ресурси та витрати (Cost<sub>Reh</sub>).

Формула складається з двох основних частин, які є елементом наукової новизни та фіксують порушення оптимальної логіки пакування: порушення логіки хабів (Destination Logic Violation) і порушення логіки SC (Stack Class Logic Violation).

Порушення логіки хабів (Destination Logic Violation) – цей компонент ураховує неефективність розвантаження за пунктами призначення (Dest). Ідеально, коли контейнери завантажують у послідовності від останнього пункту призначення до першого (так званий LIFO – Last-In, First-Out, за маршрутом).

Якщо палети розміщені в послідовності, яка потребує вивантажити палету, щоб дістатися до іншої (через порушення порядку Dest), це призводить до

додаткових операцій. Значення компонента збільшується, якщо порушена оптимальна послідовність розвантаження за хабами. Ідеальний випадок – палети згруповані за Dest так, що не потрібно пересувати палету, призначену для пізнішого хабу, щоб вивантажити палету для ранішого хабу.

Порушення логіки SC (Stack Class Logic Violation) – цей компонент ураховує порушення правил штабелювання (Stacking Rules). Як зазначено в таблиці SC, крихітні палети (із більшим SC) не можуть бути завантажені під міцні палети (із меншим SC), оскільки це призведе до пошкодження.

Індикаторна функція  $\mathbb{I}$  підраховує кількість випадків, коли палета  $i + 1$  (яка знаходиться зверху, або була завантажена пізніше) є крихітшою ( $SC_{i+1} > SC_i$ ), ніж палета  $i$  (що знаходиться знизу), і їхні пункти призначення різні ( $\text{Dest}_i \neq \text{Dest}_{i+1}$ ). Якщо призначення різних палет порушує правило штабелювання, це створює ризик пошкодження, що моделюють як необхідність додаткового оброблення (виправлення помилки пакування).

Модель порівнює чотири стратегії (табл. 4), що відрізняються своїми пріоритетами сортування ( $\mathcal{O}$ ) і критеріями відправлення ( $\mathcal{R}$ ).

## Стратегії управління потоками

Стратегія	Логіка пакування ( $\mathcal{O}$ )	Логіка відправлення ( $\mathcal{R}$ )
1. FIFO	$t_{arr,p} \uparrow > SC_p \uparrow$	Порогове
2. Хаби	$SC_p \uparrow > Dest_p$	Порогове
3. Гібридна	$D_{SLA,p} \uparrow > SC_p \uparrow > Dest_p$	Порогове
4. RL Agent	$SC_p \uparrow$	Стратегічне ( $Q_{Ship}(S) \geq \Theta$ )

**Стратегія 1. Базова (FIFO).** Сутність: класична логіка «першим прийшов – першим пішов». Система прагне відправити найстаріші палети, щоб мінімізувати середній час очікування.

Деталізація:  $t_{arr}$  є найвищим пріоритетом. Логістичну ефективність (SeqEff) ігнорують, що може призводити до частих операцій перевантаження (  $Cost_{Reh}$  ) і відправлення недозавантажених контейнерів (низька Util).

**Стратегія 2. Оптимізована (Хаби).** Сутність: фокусування на мінімізації операційних витрат і максимізації утилізації контейнера. Мета: створити максимально однорідні контейнери, згруповані за кінцевим пунктом призначення (Dest).

Деталізація: пріоритет надають SC (фізична сумісність) і Dest (маршрут). Це максимізує SeqEff, але може призвести до високого ризику порушення SLA для низькопріоритетних палет, які довго очікують на свій «оптимальний» контейнер.

**Стратегія 3. Гібридна (SLA + Хаби).** Сутність: компромісна стратегія, що балансує між двома основними цілями: уникненням фінансових витрат від штрафів (SLA) та оптимізацією витрат на логістику (хаби).

Деталізація:  $D_{SLA}$  має найвищий пріоритет, змушуючи систему запобігати критичним штрафам. Після відбору критичних палет застосовують логіку групування за Dest для підвищення SeqEff. Це стратегія «мінімакс»: мінімізація максимального ризику.

**Стратегія 4. Навчання (RL Agent).**

Сутність: адаптивна стратегія, що використовує зважену евристику для ухвалення рішення про відправлення, інтегруючи оцінювання ризику та ефективності.

Деталізація: рішення Ship ухвалюють, якщо  $Q_{Ship}(S) \geq \Theta$ . Агент динамічно реагує на  $S_3$  (критичність SLA) і  $S_6$  (тиск на хаб), діючи як інтелектуальний диспетчер.

Механізм ухвалення рішень RL Agent (агент навчання з підкріпленням) використовує спрощений евристичний підхід, заснований на основних показниках стану системи, щоб динамічно вирішувати, чи варто відправляти контейнер зараз. На відміну від стратегій 1-3, які покладаються на фіксовані порогові значення (наприклад 80 % завантаження), RL Agent ухвалює стратегічне рішення, зважуючи фінансову ефективність проти ризику.

Основний принцип: рішення про відправлення (Ship) ухвалюють, якщо оцінка цінності Дії (  $Q_{Ship}$  ) для поточного стану системи (S) перевищує певний критичний поріг ( $\Theta$ ) :

$$Ship \Leftrightarrow Q_{Ship}(S) \geq \Theta. \quad (5)$$

Розрахунок оцінки цінності дії (  $Q_{Ship}$  ):  $Q_{Ship}(S)$  – це зважена сума основних компонентів вектора стану ( S ). Кожен компонент  $S_i$  нормалізований (від 0 до 1 ) і має свою вагу (w), яку визначають на етапі навчання або налаштування моделі.

$$Q_{Ship}(S) = w_1 S_1 + w_2 S_2 + w_3 S_3 + w_6 S_6 + \dots \quad (6)$$

Детально про активні компоненти, які формують рішення:

$S_1$  (утилізація). Вплив: позитивний ( $w_1 > 0$ ). Чим вища утилізація контейнера, тим більша цінність відправлення. Це стимулює агента відправляти заповнені контейнери для максимізації П (через низькі  $cost_{Oper}$ ).

$S_2$  (відносний час очікування). Вплив: позитивний ( $w_2 > 0$ ). Чим довше контейнер простоє (чим ближче  $T_{wait,c}$  до максимуму), тим вища цінність відправлення. Це зменшує витрати на простій ( $Cost_{Idle}$ ).

$S_3$  (критичність SLA). Вплив: надзвичайно позитивний ( $w_3 \gg 0$ ). Це є найвищим пріоритетом. Чим ближче палета до свого дедлайну ( $D_{SLA}$ ), тим швидше  $S_3 \rightarrow 1$ . Агент отримує найбільше «підкріплення» (винагороди) за дію, яка запобігає штрафам PenaltySLA, що змушує його відправляти контейнер навіть за

низької утилізації, якщо є критичний вантаж.

$S_6$  (заповнення хабу). Вплив: позитивний ( $w_6 > 0$ ). Чим ближче склад хабу до максимальної місткості ( $N_{MaxHub}$ ), тим вища цінність відправлення. Цей параметр змушує агента «розвантажувати» хаб, щоб запобігти штрафам за переповнення ( $Cost_{Over}$ ) і фізичному колапсу системи.

Функціонал агента RL Agent – є інтелектуальним диспетчером, який постійно балансує між жадібністю (Greed): бажанням досягти високої утилізації ( $S_1$ ) для мінімізації вартості перевезення, і обережністю (Caution): необхідністю уникнути фінансового ризику, пов'язаного зі штрафами SLA ( $S_3$ ) і витратами на переповнення складу ( $S_6$ ).

Рішення ухвалюють на основі нормалізованого семикомпонентного вектора стану S (табл. 5).

Таблиця 5

Деталізація вектора стану RL Agent

Компонент	Параметр	Розрахунок	Пояснення	Статус
$S_1$	Утилізація (Util)	$Util_c/100$	Потреба у відправленні для максимізації ефективності	Активний
$S_2$	Відносний $T_{wait}$	$T_{wait,c}/MaxContainerWait$	Оцінювання ризику простою (витрат $Cost_{Idle}$ )	Активний
$S_3$	Критичність SLA	$1 - (D_{SLA,min} - t) / SLA_{max}$	Близькість найкритичнішої палети до дедлайну	Активний
$S_4$	Резерв: обмеження (Weight)	$W_{curr}/MaxW$	Нормалізована вага (резерв)	Неактивний
$S_5$	Резерв: обмеження (Volume)	$V_{curr}/MaxV$	Нормалізований об'єм (резерв)	Неактивний
$S_6$	Заповнення хабу	$N_{st,t}/N_{MaxHub}$	Тиск на систему, який інтерпретують з урахуванням прогнозу надходження	Активний
$S_7$	Резерв: прогнозований дохід	$Rev_{avg}/MaxRev_{sim}$	Оцінювання потенційного доходу (резерв)	Неактивний

Фінансова модель та облік ефективності, чистий прибуток ( $\Pi$ ):

$$\Pi = \left( \sum_{p \in \mathcal{P}_{shipped}} Rev_p \right) - \left( \sum_{c \in \mathcal{C}_{shipped}} Cost_{Oper,c} \right) - Cost_{Storage} - Penalty_{SLA}. \quad (7)$$

Чистий прибуток ( $\Pi$ ) є кінцевим інтегрованим показником, що використовують для порівняння ефективності всіх чотирьох стратегій. Це цільова функція оптимізації.

Формула являє собою класичне фінансове рівняння: Прибуток = Дохід – Витрати.

Сумарний дохід ( $\sum Rev_p$ ): це позитивна частина. Вона включає фіксований дохід ( $Rev_p$ ) від кожної палети, яка була успішно відправлена ( $\mathcal{P}_{shipped}$ ). Палети, які залишилися на складі після закінчення симуляції або були утилізовані (що не модельовано тут, але мають на увазі), не приносять доходу.

Сумарні операційні витрати ( $\sum Cost_{Oper,c}$ ): включає всі витрати, пов'язані з фактичним транспортуванням та обробкою відправлених контейнерів.

Витрати на зберігання ( $Cost_{Storage}$ ): включає витрати, пов'язані з утриманням палет на складі, включно зі штрафами за переповнення хабу. Ці витрати не залежать від відправлення, але залежать від часу очікування.

Сумарні штрафи ( $Penalty_{SLA}$ ): це фінансові втрати, що виникають через порушення критичних термінів доставлення. Їх віднімають від прибутку, оскільки вони є прямими фінансовими зобов'язаннями.

Стратегію, яка демонструє найвище середнє  $\bar{\Pi}$  (з урахуванням 95% довірчого інтервалу), вважають найбільш ефективною.

Вартість контейнерних операцій ( $Cost_{Oper}$ ) – це загальна сума витрат, пов'язаних безпосередньо з відправленням  $j$ -го контейнера.

$$Cost_{Oper,c} = \underbrace{Dist_c \cdot Rate_{km}}_{Cost_{Dist}} + \underbrace{N_{p,c} \cdot Cost_{Hand}}_{Cost_{Hand}} + \underbrace{T_{wait,c} \cdot Rate_{Idle}}_{Cost_{Idle}} + \underbrace{RehandlingOps_c \cdot Rate_{Reh}}_{Cost_{Reh}}. \quad (8)$$

Вона складається з чотирьох основних адитивних компонентів:

- витрати на дистанцію ( $Cost_{Dist}$ ): це базова, змінна частина транспортних витрат, що залежить від довжини маршруту.

Розраховують як добуток фактичної пройденної дистанції контейнером ( $Dist_c$ ) на фіксований тариф за кілометр ( $Rate_{km}$ );

- витрати на обробку (Handling) палет ( $Cost_{Hand}$ ): це прямі витрати на працю та ресурси складу, пов'язані з фізичним завантаженням і вивантаженням вантажу.

Розраховують як добуток кількості палет у контейнері ( $N_{p,c}$ ) на фіксовану вартість обробки однієї палети ( $Cost_{Hand}$ );

- витрати на простій контейнера ( $Cost_{Idle}$ ): це вартість, пов'язана з неефективним використанням транспортного ресурсу, який простоє в очікуванні відправлення. Тривалий простій знижує обіг контейнерного парку та може призводити до збитків.

Розраховують як добуток часу простою контейнера ( $T_{wait,c}$ ) (вимірюють від моменту завантаження першої палети до моменту відправлення) на годинну ставку простою ( $Rate_{Idle}$ );

- витрати на перевантаження ( $Cost_{Reh}$ ): це витрати, що безпосередньо впливають із порушень логіки пакування

(низька SeqEff). Вони виникають, коли на проміжних хабах потрібно здійснювати додаткові, незаплановані операції (переставлення палет) для коректного розвантаження або виправлення помилок штабелювання.

Розраховують як добуток кількості необхідних операцій перевантаження (RehandlingOps<sub>c</sub>, на фіксований тариф за одну операцію перевантаження (RateReh). Цей компонент є основним штрафом за неефективну послідовність завантаження.

*Штрафи за порушення SLA (Penalty<sub>SLA</sub>)*

Штрафи є багаторівневими:

$$\text{Pen}(p) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } t_{\text{shipped}} \leq D_{\text{SLA},p} \\ \text{Penalty}_{T1}, & \text{якщо } D_{\text{SLA},p} < t_{\text{shipped}} \leq D_{\text{SLA},p} + 24. \\ \text{Penalty}_{T2}, & \text{якщо } t_{\text{shipped}} > D_{\text{SLA},p} + 24 \end{cases} \quad (9)$$

Сутність штрафів: механізм Penalty<sub>SLA</sub> запроваджує фінансову відповідальність за затримку відправлення вантажу. Штраф є дворівневим:

Tier 1 (Penalty<sub>T1</sub>): відносно менший штраф за затримку, що не перевищує 24 години після критичного терміну D<sub>SLA</sub>.

Tier 2 (Penalty<sub>T2</sub>): значно вищий штраф, який застосовують, якщо затримка стає критичною (перевищує 24 години після дедлайну). Це відображає експоненційне зростання втрат клієнта за тривалого невиконання зобов'язань.

**Висновки.** Розроблена комплексна математична модель маршрутизації вантажів і технології їх обробки на контейнерному хабі дасть змогу зменшити порожній пробіг через запропонування альтернативного варіанта утилізації контейнерного простору за доцільними обмеженнями.

Запропонована математична модель допомагає симулювати логістичний процес накопичення палет у хабах, їх пакування в контейнери відповідно до різних стратегій і відправлення до кінцевого пункту призначення з урахуванням можливого порушення оптимальної логіки пакування

Хабів (Destination Logic Violation) і класів пакування SC (Stack Class Logic Violation).

Теоретична та практична цінність розробленої моделі полягає в такому:

- системна формалізація процесу, модель інтегрує розрізнені логістичні параметри: часові витрати, характеристики вантажу, обмеження в єдину систему рівнянь і нерівностей. Це дає змогу розглядати транспортну мережу як цілісний об'єкт керування, усуваючи проблему субоптимізації окремих ділянок;

- розширення простору допустимих рішень: використання методів математичного програмування дає змогу знаходити оптимальність серед множини допустимих варіантів, кількість яких зростає факторіально зі збільшенням кількості надходжень. Це доводить перевагу модельного підходу порівняно з інтуїтивним для розв'язання задач великої розмірності.

Результати впровадження моделі є особливо важливим кроком для зменшення навантаження на транспортну систему України, зважаючи на відновлення і стимуляцію економіки нашої країни та залізничної галузі в повоєнний період.

### Список використаних джерел

1. Чим завершилися мирні перемовини між США й Україною в Женеві: перші підсумки і «значний прогрес». URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/articles/c1j9d1dk3kdo>.

2. Стан логістики в Україні у 2024 році: нові виклики та можливості. URL: <http://surl.li/qintk> (дата звернення: 20.12.2025).
3. Токмакова, І. В., Овчиннікова, В. О., Корінь, М. В., Чорнобровка, І. В. (2021). Стратегія розвитку інфраструктури залізничного транспорту України в умовах розширення транскордонного співробітництва. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. № 72-73. С. 164-172. DOI:10.18664/btie.72-73.280200.
4. Ignacio, A., Mauricio, M., Cristobal, S. (2020). A beam search algorithm for the biobjective container loading problem. *European Journal of Operational Research*. 16 October. P. 417-431. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037722172030254X>.
5. Krebs, C., Fabian, J., Axle Weights in combined Vehicle Routing and Container Loading Problems. *EURO Journal on Transportation and Logistics*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2192437621000157>.
6. Ломотько, Д. В., Нестеренко, О. О. (2025). Пакування та розміщення контейнерних вантаж, використання контейнерного простору III Всеукраїнська наукова конференція здобувачів освіти і молодих учених «ВІДБУДОВА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ»; Національний транспортний університет 25 березня 2025 року, Київ, Україна. С. 234-235. URL: [http://kist.ntu.edu.ua/konferencii/58\\_konf\\_2025.pdf](http://kist.ntu.edu.ua/konferencii/58_konf_2025.pdf).
7. Parkhomenko, L., Butko, T., Prokhorov, V., Kalashnikova, T., Golovko, T. (2022). Building a model for planning rapid delivery of containers by rail under the conditions of intermodal transportation based on robust optimization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 5. No. 3(119). P. 06-16. URL: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/265668>.
8. Lomotko, D., Ogar, O., Kozodoy, D., Barbashyn, V., Lomotko, M. (2023). Efficiency of «Green» Logistics Technologies in Multimodal Transportation of Dangerous Goods. AIP Conference Proceedings.
9. Wagner, Natalia, Kotowska, Izabela, Pluciński, Michał. (2022). The Impact of Improving the Quality of the Port's Infrastructure on the Shippers. *Decisions Sustainability (MDPI)*. Vol. 14, Iss. 10. 6255. DOI: 10.3390/su14106255.
10. Zhang, Jian, Kai, Luo, Alessandro M. Florio, Tom Van, Woensel. (2022). Olving Large-Scale Dynamic Vehicle Routing Problems with Stochastic Requests. *European Journal of Operational Research (EJOR)*. Vol. 306, Iss. 2. P. 596–614. DOI: 10.1016/j.ejor.2022.07.015.
11. Escobar-Vargas, David, Crainic, Teodor Gabriel, Rei, Walter. Multi-attribute two-echelon location routing: Formulation and dynamic discretization discovery approach. *European Journal of Operational Research (EJOR)*. Vol. 314/1. P. 66–78. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221723007476>.
12. Stroh, N., Erera, A. L., Toriello, A. (2022). Managing Same-Day Delivery Systems with Order Deadlines. *INFORMS*. Vol. 68(5). P. 3444-3463. URL: <https://ideas.repec.org/a/inm/ormnsc/v68y2022i5p3444-3463.html>.
13. Dulebenets, Maxim A. (2019). A delayed start parallel evolutionary algorithm for truck scheduling at a cross-docking terminal with service time uncertainty. *International Journal of Production Economics*. Vol. 212. P. 236-258. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.02.017>.
14. Ashrabi, Ananno A., Ribeiro, L. (2024). A Multi-Heuristic Algorithm for Multi-Container 3-D Bin Packing Problem Optimization Using Real World Constraints. *IEEE Access*. Vol. 12. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10473069>.
15. Fan, X., Xuefeng, Z. Multi-Objective Optimization for Mep Module Bin Packing Considering Transportation Stability and Assembly Sequence. URL: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=5364993](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5364993).
16. Perić, N., Kolak, A., Lešić, V. (2025). Modular Coordination of Vehicle Routing and Bin Packing Problems in Last Mile Logistics. *Logistics (MDPI)*. Vol. 9, Iss. 2. URL: <https://www.mdpi.com/2305-6290/9/2/70>.

### References

1. Chym zavershyls' myrni peremovyny mizh SSHA y Ukrayinoyu v Zhenevi: pershi pidsumky i «znachnyy prohres». [What ended the peace talks between the US and Ukraine in Geneva: initial results and "significant progress"]. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/articles/c1j9d1dk3kdo> [in Ukrainian].
2. Stan lohistyky v Ukrayini u 2024 rotsi: novi vyklyky ta mozhlyvosti [State of logistics in Ukraine in 2024: new challenges and opportunities]. <http://surl.li/qintk> (дата звернення: 20.12.2025) [in Ukrainian].
3. Tokmakova, I. V., Ovchinnikova, V. O., Korin, M. V., Chornobrovka, I. V. (2021). Stratehiya rozvytku infrastruktury zaliznychnoho transportu Ukrayiny v umovakh rozshyrennya transkordonnoho spivrobotnytstva. [Strategy for the development of railway transport infrastructure in Ukraine in the context of expanding cross-border cooperation]. *Bulletin of the Economy of Transport and Industry*. No. 72-73. Pp. 164-172. DOI:10.18664/btie.72-73.280200 [in Ukrainian].
4. Ignacio, A., Mauricio, M., Cristobal, S. (2020). A beam search algorithm for the biobjective container loading problem. *European Journal of Operational Research*. 16 October. P. 417-431. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037722172030254X>.
5. Krebs, C., Fabian, J., Axle Weights in combined Vehicle Routing and Container Loading Problems. *EURO Journal on Transportation and Logistics*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2192437621000157>.
6. Lomotko, D. V., Nesterenko, O. O. (2025). Pakuvannya ta rozmishchennya konteynernykh vantazh, vykorystannya konteynernoho prostoru [Packaging and placement of container cargo, use of container space]. *III All-Ukrainian Scientific Conference of Students and Young Scientists "RECONSTRUCTION OF THE TRANSPORT INFRASTRUCTURE OF UKRAINE"; National Transport University March 25*. Kyiv, Ukraine. Pp. 234-235. [http://kist.ntu.edu.ua/konferencii/58\\_konf\\_2025.pdf](http://kist.ntu.edu.ua/konferencii/58_konf_2025.pdf) [in Ukrainian].
7. Parkhomenko, L., Butko, T., Prokhorov, V., Kalashnikova, T., Golovko, T. (2022). Building a model for planning rapid delivery of containers by rail under the conditions of intermodal transportation based on robust optimization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 5. No. 3(119). P. 06-16. <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/265668> [in English].
8. Lomotko, D., Ogar, O., Kozodoy, D., Barbashyn, V., Lomotko, M. (2023). Efficiency of «Green» Logistics Technologies in Multimodal Transportation of Dangerous Goods. *AIP Conference Proceedings*. [in English].
9. Wagner, Natalia, Kotowska, Izabela, Pluciński, Michał. (2022). The Impact of Improving the Quality of the Port's Infrastructure on the Shippers. *Decisions Sustainability (MDPI)*. Vol. 14, Iss. 10. 6255. DOI: 10.3390/su14106255.
10. Zhang, Jian, Kai, Luo, Alessandro M. Florio, Tom Van, Woensel. (2022). Olving Large-Scale Dynamic Vehicle Routing Problems with Stochastic Requests. *European Journal of Operational Research (EJOR)*. Vol. 306, Iss. 2. P. 596–614. DOI: 10.1016/j.ejor.2022.07.015.
11. Escobar-Vargas, David, Crainic, Teodor Gabriel, Rei, Walter. Multi-attribute two-echelon location routing: Formulation and dynamic discretization discovery approach. *European Journal of Operational Research (EJOR)*. Vol. 314/1. P. 66–78. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221723007476>.
12. Stroh, N., Erera, A. L., Toriello, A. (2022). Managing Same-Day Delivery Systems with Order Deadlines. *INFORMS*. Vol. 68(5). P. 3444-3463. <https://ideas.repec.org/a/inm/ormsc/v68y2022i5p3444-3463.html>.
13. Dulebenets, Maxim A. (2019). A delayed start parallel evolutionary algorithm for truck scheduling at a cross-docking terminal with service time uncertainty. *International Journal of Production Economics*. Vol. 212. P. 236-258. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.02.017>.

14. Ashrabi, Ananno A., Ribeiro, L. (2024). A Multi-Heuristic Algorithm for Multi-Container 3-D Bin Packing Problem Optimization Using Real World Constraints. *IEEE Access*. Vol. 12. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10473069>.

15. Fan, X., Xuefeng, Z. Multi-Objective Optimization for Mep Module Bin Packing Considering Transportation Stability and Assembly Sequence. [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=5364993](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5364993).

16. Perić, N., Kolak, A., Lešić, V. (2025). Modular Coordination of Vehicle Routing and Bin Packing Problems in Last Mile Logistics. *Logistics (MDPI)*. Vol. 9, Iss. 2. <https://www.mdpi.com/2305-6290/9/2/70>.

---

Нестеренко Олександр Олександрович, аспірант кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту, майдан Феєрбаха, 7, м. Харків, 61050, Україна.  
Тел.: +38(063)2122482. E-mail: nesterenko8@kart.edu.ua ORCID ID: 0009-0007-3688-3684.

Nesterenko O. O. postgraduate student, Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38(063)2122482. E-mail: nesterenko8@kart.edu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-3688-3684>.

Дата надходження статті 23.01.2026 р.

Дата прийняття статті до друку 02.03.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті 4.05.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.