

## АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ЗАСОБІВ НАВАНТАЖЕННЯ-РОЗВАНТАЖЕННЯ В ПРОЦЕСІ ОРГАНІЗАЦІЇ РОБОТИ СКЛАДУ

Павленко О. В., Рижиков М. В., Барміна Д. В.  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

*Анотація.* У статті розглянуті варіанти застосування засобів навантаження-розвантаження в процесі організації роботи складу. Розроблена математична модель визначення оціночного показника – площі складу, на яку впливають параметри складу та засобів навантаження-розвантаження. Розроблені регресійні моделі ступеневого типу для двох варіантів організації роботи складу.

*Ключові слова:* складська логістика, технологія, площа, модель, регресія.

### Вступ

Розвиток виробничих систем передбачає впровадження нових процедур, без яких стабільність основної діяльності підприємства може бути порушена. Для забезпечення безперебійності роботи необхідне застосування різноманітних матеріальних ресурсів, що також визначає необхідність наявності складу як ключового елемента загальної логістичної інфраструктури. Такими заходами є переміщення матеріалів між географічно розподіленими виробничими зонами, робочими зонами та/або складськими приміщеннями, інтегрованими в єдиний виробничо-логістичний ланцюг [1].

Дослідження в галузі складської логістики насамперед зосереджені на теоретичних аспектах і не містять комплексних підходів до систематичної раціоналізації процесів. Найбільша увага приділяється вдосконаленню процесу комплектування замовлень, зокрема на розподільчих складах. У дослідженні [1] автори аналізують інтегрований метод аналізу й оптимізації складських операцій з використанням інструментів ощадливого виробництва. Запропонований підхід продемонстровано на прикладі проектування складських площ і збільшення рівня ефективності використання обладнання, зокрема механізмів завантаження та розвантаження. Отже, для збільшення рівня ефективності використання засобів механізації необхідно впроваджувати інноваційні технології, засновані на нестандартних технічних і організаційних рішеннях.

### Аналіз публікацій

Витрати на логістику постачання становлять значну частину загальних виробничих

витрат. Ефективність і результативність будь-якої дистрибуційної мережі значною мірою залежать від функціонування її ключових елементів – складів [2]. Організація складування вимагає високого рівня координації всіх операцій, які складаються з чотирьох основних функцій: приймання, зберігання, комплектування замовлень і відвантаження.

Діяльність складу та пов'язані з нею витрати мають вирішальний вплив на ефективність усього ланцюга постачання. Одним із пріоритетних напрямів досліджень у галузі управління складськими системами є вдосконалення процесу комплектування замовлень, що передбачає раціональне використання ресурсів і впровадження нових технічних і технологічних рішень [2].

Під час війни складські комплекси є найактивнішим сегментом ринку комерційної нерухомості. Попит на логістично-складські площі значно перевищує попит на торгові центри [3].

Серед актуальних проблем у функціонуванні складських систем як основних елементів транспортного процесу можна визначити декілька основних: раціональне використання складських ресурсів [3, 4], комплексна оптимізація процесів у багаторівневих складських структурах [5, 6], формування ефективною логістичної системи управління матеріальними потоками [7, 8], а також забезпечення стабільного функціонування в кризових ситуаціях [9, 10].

У складських системах матеріальні потоки зазнають трансформації – від динамічних до статичних і навпаки [6]. Під час зберігання та оброблення товарів потоки можуть надходити з одними характеристиками і ви-

ходити з іншими. Основними параметрами потоків є інтенсивність, ритм, пропускна здатність, структура, тип і спосіб упаковки продукції, час прибуття і відправлення транспортних партій тощо.

Якщо немає необхідності змінювати ці характеристики на певних ділянках транспортної мережі, зникає необхідність у створенні складів або центрів перетворення, які можуть містити кілька типів складських комплексів.

Нерозуміння функції складів в управлінні складними поточковими процесами призводить до неефективної організації транспортних мереж [11] і виникнення проблем у загальній системі виробництва, розподілу, фізичного переміщення та споживання продукції [12]. Сучасна логістика розвивається в такий спосіб, що склади, крім традиційних функцій накопичення запасів, все частіше використовуються як центри крос-докінгу [13].

У дослідженнях із вдосконалення технологій роботи складів і терміналів, основний акцент робиться на забезпеченні ефективної взаємодії між усіма етапами складських операцій під впливом випадкових факторів. Під час аналізу технології роботи складів, що працюють на логістичному ринку, було визначено декілька організаційних недоліків: не враховуються альтернативні варіанти здійснення ключових операцій за зміни параметрів технологічного процесу, нераціонально використовуються складські ресурси, недостатньо впроваджені сучасні технічні засоби для проведення вантажно-розвантажувальних операцій.

Тому для забезпечення ефективної організації технології всього комплексу складських процесів, підвищення продуктивності та зниження вартості доставки товарів в умовах інтенсивних вантажопотоків на наявних складах необхідно впроваджувати ефективні технології складської технології з використанням сучасних високоманеврених технічних засобів.

#### Мета та постановка завдання

Метою дослідження є визначення ефективного варіанта організації роботи складу внаслідок впровадження нових технічних засобів навантаження-розвантаження.

Для досягнення визначеної мети необхідно розробити два альтернативні варіанти організації роботи складу за участю механізму для здійснення навантаження-розвантаження та переміщення вантажу; розробити математичну модель визначення складових

оціночного показника; здійснити статистичний аналіз параметрів впливу й експериментальні дослідження із визначення ефективної технології складської роботи; розробити регресійні моделі відповідного типу для визначення впливу параметрів складу на оціночний параметр.

#### Виклад основного матеріалу

Навіть під час оптимально організованого внутрішнього процесу на складі робота в ньому не буде достатньо ефективною, якщо не буде забезпечена належна організація прийому, відправлення та переміщення вантажно-розвантажувального обладнання на території складського комплексу, а також якщо технічні засоби не будуть раціонально розташовані. Однією з ключових тенденцій розвитку сучасних систем зберігання та оброблення вантажів є підвищення рівня концентрації та поглиблення спеціалізації. Це також сприяє гармонізації складської інфраструктури через її інтеграцію з основним виробництвом підприємства та транспортними системами [14].

У дослідженні пропонується порівняти два варіанти організації роботи складу за участю засобу для здійснення навантаження-розвантаження та переміщення вантажу: 1 варіант: стандартний механізм – електронавантажувач (ЕН), 2 варіант: високоманеврений навантажувач, технічні характеристики якого наведені в [15].

Переваги запропонованої в [15] конструкції механізму дозволяють зменшити ширину проходів між стелажми в зоні складування, а також зменшити площу, необхідну для прийому та видачі товарів. Для аналізу варто розглянути типовий складський об'єкт, де стелажі, проходи та проїзди встановлені відповідно до чинних стандартів (рис. 1).

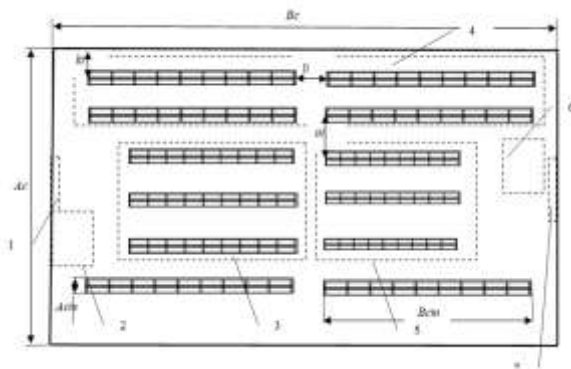


Рис. 1. Схема складу, що розглядається

На такому об'єкті можуть працювати як стандартні навантажувачі (у нашому випадку це електронавантажувачі – ЕН з аналогічними-

ми характеристиками вантажопідйомності та габаритів), так і запропоновані в [15] засоби – високоманеврені транспортні механізми.

На рис. 1 наведені такі позначення:

1) технічні параметри складу:  $B_c$  – довжина складського приміщення, м;  $A_c$  – ширина складського приміщення, м;  $k_i$  – ширина проїзду між стінкою складу та стелажми відповідного  $i$ -го розміру, м;  $A_{cm}$  – ширина стелажу для зберігання вантажу, м;  $B_{cm}$  – довжина стелажу для зберігання вантажу, м;  $a_i$  – відстань між проміжними стелажми відповідного  $i$ -того розміру, м;  $l_i$  – відстань між стелажми основного проїзду відповідного  $i$ -того розміру, м;

2) зони обслуговування: 1 – зона розвантаження, 2 – зона приймання експедицією, 3 – зона приймання на зберігання, 4 – зона зберігання, 5 – зона комплектування, 6 – зона експедиції відправлення, 7 – зона завантаження визначеної партії вантажу на транспортні засоби.

Для визначення ефективного варіанта організації роботи складу під час використання спеціалізованих засобів навантаження-розвантаження пропонується оціночний параметр – площа складу:

$$S_{скл} = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}, \forall n = \{1; 7\}, \quad (1)$$

де  $S_1, S_2, \dots, S_n$  – площі встановлених зон, м<sup>2</sup>;  $n$  – номер зони складу.

Як технологічні параметри (зовнішнього середовища) в дослідженні пропонується розглядати такі: обсяг вантажу, який обслуговується на складі ( $Q_{скл}$ ), т; середнє значення тривалості зберігання запасів вантажу на території складу, год, ( $D_{збр}$ ); коефіцієнт нерівномірності завантаження площі складу ( $k_{нер}$ ); навантаження одиниці вантажу на визначену площу складу ( $H_{скл}$ ), т/м<sup>2</sup>.

Керованими параметрами будуть значення технічних характеристик засобів навантаження-розвантаження, значення яких впливає на час здійснення операцій із навантаження, переміщення та розвантаження вантажу на складі: швидкість руху, м/с; висота підйому вил, м; радіус повороту, м.

Пропонується математична модель визначення площі складу, в якій враховуються визначені зони обслуговування вантажу, а також технологічні параметри:

$$S_{скл} = \frac{Q_{скл} \cdot k_{нпр} \cdot T_{скл}^D \cdot D_p \cdot D_{збр} \cdot k_{нер}}{T_{ц} + T_{до}} + \frac{A_c \cdot B_c \cdot Q_{скл} \cdot T_{скл}^D}{Q_{сод} \cdot T_{ц} + T_{до}} + \frac{Q_{скл} \cdot k_{нпр} \cdot T_{скл}^D \cdot D_p \cdot k_{нер} \cdot S_{нр} \cdot T_{нр}}{T_{ц} + T_{до}} + \frac{Q_{скл} \cdot k_{нпр} \cdot T_{скл}^D \cdot D_p \cdot k_{нер} \cdot S_k \cdot t_k}{T_{ц} + T_{до}} + N_{кр} \cdot S_{нн} + \frac{Q_{скл} \cdot k_{нпр} \cdot T_{скл}^D \cdot D_p \cdot k_{нер} \cdot S_{нре} \cdot t_{нре}}{T_{ц} + T_{до}} + \frac{Q_{скл} \cdot k_{нпр} \cdot T_{скл}^D \cdot D_p \cdot k_{нер} \cdot S_{ев} \cdot t_{ев}}{T_{ц} + T_{до}}, \quad (2)$$

де  $k_{нпр}$  – коефіцієнт використання продуктивності засобів навантаження-розвантаження;  $T_{скл}^D$  – час роботи обладнання складу протягом доби, год;  $k_{вс}$  – коефіцієнт використання всього об'єму складу (корисного);  $T_{ц}$  – час циклу роботи засобів механізації процесу навантаження-розвантаження, год;  $T_{до}$  – час здійснення необхідних додаткових операцій на складі, год;  $Q_{сод}$  – середньодобовий обсяг вантажу, який зберігається на складі, т;  $S_{нр}$  – частка визначеної кількості вантажів, яка проходить крізь зону приймання складу, од.;  $T_{нр}$  – час знаходження визначеної кількості вантажів у зоні приймання складу, год;  $S_k$  – частка визначеної кількості вантажів, яка перероблялася в зоні комплектування, од.;  $t_k$  – час знаходження визначеної кількості вантажів у зоні комплектування, год;  $N_{кр}$  – кількість задіяних робітників, які працюють у зонах складу, роб.;  $S_{нн}$  – нормативна площа зон складу, яка відведена для обладнання визначених місць працівників складу, роб./м<sup>2</sup>;  $S_{нре}$  – частка визначених вантажів, яка проходить крізь зону приймальної експедиції, од.;  $t_{нре}$  – час знаходження вантажу

в експедиції приймання, год;  $s_{ев}$  – частка визначених вантажів, яка проходить крізь зону експедиції відправлення, од.;  $t_{ев}$  – час знаходження визначеного вантажу в зоні експедиції відправлення, год.

Час циклу роботи засобів механізації здійснення процесів навантаження-розвантаження:

$$T_{ц} = (T_p + T_n + T_{mp}) \cdot \Phi_{сум}, \quad (3)$$

де  $T_p$  – час на здійснення розвантажувальних операцій із вантажем на складі, год;  $T_n$  – час на здійснення навантажувальних операцій із вантажем на складі, год;  $T_{mp}$  – час на здійснення операцій із переміщення вантажу навантажувачем вздовж складу, год;  $\Phi_{сум}$  – коефіцієнт суміщення визначених операцій протягом всього робочого циклу.

Під час вирішення цього завдання застосовують такі припущення:

- технологія роботи складу має відповідну послідовність технологічних операцій у кожній зоні функціонування;
- приймається вантаж першого класу;
- кількість механізмів для навантаження-розвантаження на складі буде постійною та дорівнювати одиниці;
- порівнюються два засоби навантаження-розвантаження: високоманеврений навантажувач та електронавантажувач.

Значення параметрів, які визначають роботу засобів, наведені в табл. 1.

У табл. 1 наведені значення керованих параметрів в інтервалі від мінімального до максимального. Вони визначені в процесі спостереження за роботою механізмів на складі ТОВ «ОЛЛ ТРАК ПАРТС».

Для проведення якісного статистичного аналізу інтервалів варіювання факторів впливу (обсяг вантажу, який обслуговується на складі, середнє значення тривалості зберігання запасів вантажу на території складу, коефіцієнт нерівномірності завантаження площі складу, навантаження одиниці вантажу на в площу складу) були визначенні їхні максимальні та мінімальні значення за результатами діяльності ТОВ «ОЛЛ ТРАК ПАРТС» (табл. 2).

За допомогою спеціальної програми «Statistica.exe» з урахуванням інтервалів значень випадкових величин були проведені розрахунки із виявлення значень показників законів розподілу вхідних керованих параметрів.

Визначено, що ці параметри розподілені за нормальним законом (доведено відповідним рівнем довірчої імовірності).

Для досягнення максимальної точності вимірювань за мінімальної кількості досліджень і збереження статистичної достовірності результатів розроблено повнофакторний план експерименту для чотирьох вхідних параметрів (табл. 3).

Таблиця 1 – Характеристики засобів навантаження-розвантаження

Показник	Значення показника механізму	
	Високоманеврений навантажувач	Електро-навантажувач
Вантажність, т	1	1
Висота підйому вил, м	4,5	3
Швидкість руху, м/с	2,9–3,1	3,3–3,9
Швидкість підйому вил, м/с	0,15–0,21	0,18–0,24
Кут нахилу рами, град.	вперед	3
	назад	10
Радіус повороту, м	0,78–0,92	1,3–1,9

Таблиця 2 – Значення інтервалів варіювання параметрів впливу

Назва параметра	Значення	
	Мінімальне	Максимальне
1. Обсяг вантажу, який обслуговується на складі, т.	45	264
2. Середнє значення тривалості зберігання запасів вантажу на території складу, год	1,1	2,8
3. Коефіцієнт нерівномірності завантаження площі складу	0,52	0,87
4 Навантаження одиниці вантажу на визначену площу складу, т/м <sup>2</sup>	0,34	2,1

Таблиця 3 – План експерименту зі значеннями вхідних параметрів

Серія дослідів	Рівні варіювання параметра			
	1	2	3	4
1	264	2,8	0,87	0,34
2	264	2,8	0,52	0,34
3	264	1,1	0,52	0,34
4	45	2,8	0,87	2,1
5	45	1,1	0,87	2,1
6	45	1,1	0,52	2,1
7	45	2,8	0,52	2,1
8	264	1,1	0,87	0,34
9	45	1,1	0,52	0,34
10	264	2,8	0,87	2,1
11	264	1,1	0,52	2,1
12	264	1,1	0,87	2,1
13	45	2,8	0,87	0,34
14	264	2,8	0,52	2,1
15	45	1,1	0,87	0,34
16	45	2,8	0,52	0,34

Нами було проведено шістнадцять екстремальних експериментальних дослідів. Кожен із них складався із двадцяти пілотних експериментів, де змінювалися двадцять значень керованих параметрів: швидкість руху, висота підйому вил, радіус повороту за визначеним законом розподілу випадкових величин.

Проведено тестування на достатність відповідно до критеріїв Кохрена. Гіпотезу про тип моделі нами було підтверджено. На основі розробленого плану висувається гіпотеза про нелінійність функціональної залежності значень визначених аргументів.

За допомогою програми «MS Excel» і вбудованого елемента надбудови «Data Analysis-Regression» були визначені такі показники: дисперсія, коефіцієнти рівняння за змінними, регресійна статистика. Оціночний параметр площа складу був розрахований для кожного варіанта.

Перевірено значення коефіцієнтів моделі регресії. Всі параметри впливу виявилися значущими за значенням «стандартної помилки», «*p*-значень», «*t*-статистики», «мінімального та максимального екстремумів».

Регресійні моделі ступеневого типу для розрахунку площі складу «Варіант 1»:

$$S_{скл}^1 = e^{7,077} \cdot Q_{скл}^{0,992} \cdot D_{збр}^{-0,993} \cdot k_{нер}^{0,993} \cdot H_{скл}^{-0,992} \quad (4)$$

Регресійні моделі ступеневого типу для розрахунку площі складу «Варіант 2»:

$$S_{скл}^2 = e^{6,883} \cdot Q_{скл}^{0,99} \cdot D_{збр}^{-0,991} \cdot k_{нер}^{0,991} \cdot H_{скл}^{-0,991} \quad (5)$$

Визначено технологічний ефект запропонованих рішень щодо використання засобів навантаження-розвантаження ватажу на складі через порівняння значень площі складу між першим та другим варіантами за визначеними регресійними моделями за зміни значень параметрів впливу за відповідними серіями дослідів (рис.2).

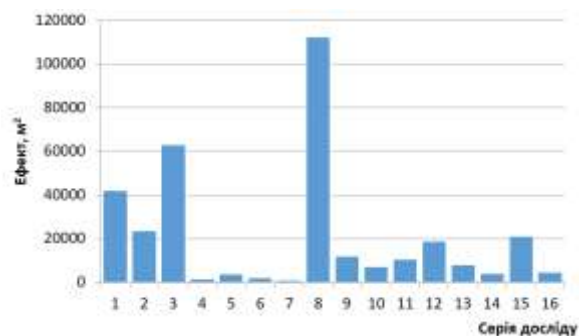


Рис. 2. Результати визначення технологічного ефекту за серіями дослідів

Результати визначення технологічного ефекту довели, що використання високоманеврених навантажувачів («Варіант 2») найбільш вигідне за всіх значеннях параметрів впливу завдяки більш ефективній організації здійснення операцій з навантаження-розвантаження та переміщення вантажу вздовж складу.

### Висновки

У системі доставки різних видів вантажів складські операції можуть здійснювати протягом значного обсягу часу та впливати на якість проведеної роботи. Тому визначено ефективний варіант організації роботи складу за умови використання спеціалізованих засобів навантаження-розвантаження.

Запропоновано порівняти два варіанти організації роботи складу за використання механізму для здійснення навантаження-розвантаження та переміщення вантажу: перший варіант – стандартний механізм – електронавантажувач, а другий варіант – високоманеврений навантажувач, технічні характеристики якого дозволяють зменшити площу для маневрування.

Розроблена математична модель визначення оціночного показника – площа складу, на яку впливають параметри зовнішнього середовища: обсяг вантажу, який обслуговується на складі, середнє значення тривалості зберігання запасів вантажу на території складу, коефіцієнт нерівномірності завантаження площі складу, навантаження одиниці вантажу на визначену площу складу, а також керовані параметри: швидкість руху, висота підйому вил, радіус повороту

Здійснено статистичний аналіз інтервалів варіювання факторів впливу. Визначена кількість спостережень за кожним фактором. За допомогою спеціальної програми «Statistica.exe» з урахуванням інтервалів значень випадкових величин були проведені розрахунки із виявлення значень показників законів розподілу вхідних параметрів. Всі параметри впливу розподілені за нормальним законом розподілу. Для досягнення максимальної точності вимірювань за мінімальної кількості досліджень і збереження статистичної достовірності результатів розроблено повнофакторний план експерименту для чотирьох параметрів впливу.

За складеним чотирьохфакторним планом експерименту визначені значення площі складу для двох варіантів. Розроблені прогностичні моделі нелінійного типу, в яких враховані всі визначені параметри впливу. Ре-

зультати визначення технологічного ефекту довели, що використання високоманеврених механізмів (варіант 2) найбільш ефективно за всіх значень параметрів впливу завдяки більш ефективній організації здійснення операцій із навантаження-розвантаження та переміщення вантажу вздовж складу. Найбільший рівень економії площі складу за рік його експлуатації становить 112103 м<sup>2</sup>, це значення досягається за максимального рівня значень обсягу вантажу, який обслуговується на складі (264 тонни) та коефіцієнта нерівномірності завантаження площі складу (0,87), але за мінімальних значень середньої тривалості зберігання запасів вантажу на території складу (1,1 година) та навантаження одиниці вантажу на визначену площу складу (0,34 т/м<sup>2</sup>).

У подальшому планується розробити імітаційну модель технології роботи складу з урахуванням використання нових засобів механізації у спеціалізованому програмному середовищі «MATLAB».

### Література

- Đurđević D., Manasijević S., Miljuš M. Rationalization of a Core Warehouse in the Casting Plant: A Case Study. *Transactions of FAMENA*. 2020. Vol. 43(4), 109–121. <https://doi.org/10.21278/tof.43409>
- Živičnjak M., Rogić K., Bajor I. Case-study analysis of warehouse process optimization. *Transportation Research Procedia*. 2022. Vol. 64. 215–223. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.09.026>
- Alhassow M. M., Ata O., Atilla D. C. Multi-agents path planning for a mobile robot in a dynamic warehouse environment. *In International Conference on Computing, Intelligence and Data Analytics*. 2022. 520–534. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-27099-4\\_40](https://doi.org/10.1007/978-3-031-27099-4_40)
- Склади готуються до стрибка: що змінилось на ринку в 2025 році. URL: <https://delo.ua/realty/skladi-gotuyutsya-do-stribka-shho-zminilos-na-rinku-v-2025-roci-441178/> (дата звернення: 21.10.25)
- Decision analysis of warehouse productivity performance indicators to enhance logistics operational efficiency / N. S. F. Abdul Rahman et al. *International Journal of Productivity and Performance Management*. 2023. Vol. 72(4). 962–985. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-06-2021-0373>
- Таран І., Литвин В., Клименко І. Оптимізація функціонування складського комплексу з фронтальними стелажми у середовищі ANY-LOGIC. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2023. № 20(1). С. 260–271. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i20.1055>
- Orda O., Nagornyy Y., Potaman N. Approach to the forming of rational technology for the export cargoes delivery in supply chain on the principles of co-modality. *ETR*. 2024. Vol. 3. 194–199. <https://doi.org/10.17770/etr2023vol3.7301>

8. Kocaman Y., Öztürkoğlu Ö., Gümüsoğlu Ş. Aisle designs in unit-load warehouses with different flow policies of multiple pickup and deposit points. *Central European Journal of Operations Research*. 2021. Vol. 29(1). 323–355. <https://doi.org/10.1007/s10100-019-00646-9>
9. Павленко О. В., Рижигов М. В. Визначення умов ефективного використання ресурсів у процесі функціонування складської системи. *Вісник ХНАДУ*. 2024. Вип. 107. С. 140–147. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.107.0.140>
10. Muzylyov D. Medvediev I. Pavlenko O. Risk factor assessment in agricultural supply chain by fuzzy logic. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1376(1). 012038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012038>
11. Choosing a servicing company's strategy while interacting with freight owners at the road transport market / G. Nugymanova et al. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. Vol. 1. 204–210. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/204>
12. Choosing the logistics chain structure for deliveries of bulk loads: case study of the Republic Kazakhstan / B. Ramazan et al. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. Vol. 3. 142–147. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-3/142>
13. Complexity of flow time minimization in a crossdock truck scheduling problem with asymmetric handover relations / Q. Fabry et al. *Operations Research Letters*. 2022. Vol. 50(1). 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.orl.2021.12.004>
14. Zeng Y.Q., Li W.B., Li C.H. A dynamic simulation framework based on hybrid modeling paradigm for parallel scheduling systems in warehouses. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2024. Vol. 133. 102921. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2024.102921>
15. Павленко О. В., Калініченко О. П. Методика визначення ефективного варіанта технології роботи складу при використанні високоманеврених та енергоефективних багатовісних автомобілів. *Комунальне господарство міст*. 2023. № 180(6). С. 244–249. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-6-180-244-249>
16. Data Analytics, 520–534. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-27099-4\\_40](https://doi.org/10.1007/978-3-031-27099-4_40)
17. Warehouses are preparing for the jump: what has changed in the market in 2025. URL: <https://delo.ua/realty/skladi-gotyuyutsya-dostribka-shho-zminilos-na-rinku-v-2025-roci-441178/>
18. Abdul Rahman, N. S. F., Karim, N. H., Md Hanafiah, R., Abdul Hamid, S., Mohammed A. (2023). Decision analysis of warehouse productivity performance indicators to enhance logistics operational efficiency. *International Journal of Productivity and Performance Management*, vol. 72(4), 962–985. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-06-2021-0373>
19. Taran, I., Lytvyn, V., Klymenko, I. (2023). Optimization of the functioning of a warehouse complex with frontal racks in the ANYLOGIC environment. *Modern technologies in mechanical engineering and transport*, vol. 20(1), 260–271. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i20.1055>
20. Orda, O., Nagornyy, Y., Potaman, N. (2024). Approach to the forming of rational technology for the export cargoes delivery in supply chain on the principles of co-modality. *ETR*, vol. 3, 194–199. <https://doi.org/10.17770/etr2023vol3.7301>
21. Kocaman, Y., Öztürkoğlu, Ö., Gümüsoğlu, Ş. (2021). Aisle designs in unit-load warehouses with different flow policies of multiple pickup and deposit points. *Central European Journal of Operations Research*, vol. 29(1), 323–355. <https://doi.org/10.1007/s10100-019-00646-9>
22. Pavlenko, O. V., Ryzhykov, M. V. (2024). Determining the conditions for the effective use of resources in the process of functioning of the warehouse system. *Bulletin of the KhNADU*, vol. 107, 140–147. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.107.0.140>
23. Muzylyov, D. Medvediev, I. Pavlenko, O. (2024). Risk factor assessment in agricultural supply chain by fuzzy logic. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1376(1), 012038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012038>
24. Nugymanova, G., Nurgaliyeva, M., Zhanbirov, Z., Naumov, V., Taran, I. (2021). Choosing a servicing company's strategy while interacting with freight owners at the road transport market. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, vol. 1, 204–210. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/204>
25. Ramazan, B., Mussaliyeva, R., Bitileuova, Z., Naumov, V., Taran, I. (2021). Choosing the logistics chain structure for deliveries of bulk loads: case study of the Republic Kazakhstan. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, vol. 3, 142–147. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-3/142>
26. Fabry, Q., Agnetis, A., Berghman, L., Briand, C. (2022). Complexity of flow time minimization in a crossdock truck scheduling problem with asymmetric handover relations. *Operations Research*

### References

1. Đurđević, D., Manasijević, S., Miljuš M. (2020). Rationalization of a Core Warehouse in the Casting Plant: A Case Study. *Transactions of FAME-NA*, vol. 43(4), 109–121. <https://doi.org/10.21278/tof.43409>
2. Živičnjak, M., Rogić, K., Bajor, I. (2022). Case-study analysis of warehouse process optimization. *Transportation Research Procedia*, vol. 64, 215–223. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.09.026>
3. Alhassow, M. M., Ata, O., Atilla, D. C. (2022). Multi-agents path planning for a mobile robot in a dynamic warehouse environment. *In International Conference on Computing, Intelligence and*

- Letters*, vol. 50(1), 50–56 <https://doi.org/10.1016/j.orl.2021.12.004>
14. Zeng, Y. Q., Li, W. B., Li, C. H. (2024). A dynamic simulation framework based on hybrid modeling paradigm for parallel scheduling systems in warehouses. *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 133, 102921. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2024.102921>
15. Pavlenko, O. V., Kalinichenko, O. P. (2023). Methodology for determining an effective variant of warehouse operation technology when using highly maneuverable and energy-efficient multi-axle vehicles. *Municipal economy of cities*, vol. 180(6), 244–249. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-6-180-244-249>

**Павленко Олексій Вікторович**, к.т.н., доц.  
каф. транспортних технологій,  
[ttpov@ukr.net](mailto:ttpov@ukr.net),  
тел.: +38 095-737-69-78

**Рижиков Микола Вадимович**, аспірант  
каф. транспортних технологій,  
[sonixiomi@gmail.com](mailto:sonixiomi@gmail.com),  
тел.: +38 063-383-55-53

**Барміна Дар'я**, студент факультету  
транспортних систем,  
[barminadasha2020@gmail.com](mailto:barminadasha2020@gmail.com),  
тел.: +38 066-415-77-90

Харківський національний автомобільно-  
дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого,  
25, м. Харків, 61002, Україна.

### Assessment Of The Effectiveness Of Specialized Loading And Unloading Equipment In Warehouse Operations

**Abstract. Problem.** *In the delivery system of various types of cargo, warehouse operations can take a significant amount of time and affect the quality of work performed. Therefore, an effective option for organizing warehouse operations using specialized loading and unloading equipment has been identified. Goal.* *Determining the most efficient organization of warehouse operations by implementing new loading and unloading equipment. Methodology.* *The article considers options for organizing warehouse operations depending on the methods of loading and unloading. A mathematical model has been developed to determine the calculated indicator – the warehouse area, which is influenced by the pa-*

*rameters of the warehouse operation technology. A statistical analysis of the variation intervals of the established influence factors has been carried out. The number of observations for each factor has been determined. All influence parameters are distributed according to the law of normal distribution. Stepwise regression models have been developed for two options for the warehouse operation technology. Originality.* *Nonlinear predictive models have been developed for two warehouse organization options, taking into account all identified impact parameters. The resulting dependencies allow decision-making conditions to be obtained depending on the parameters of the technological process in the warehouse. Practical value.* *The use of highly maneuverable mechanisms is the most effective at all values of the impact parameters, due to a more efficient organization of loading, unloading and movement of cargo around the warehouse. The greatest savings in warehouse space per year of operation is achieved at the maximum level of cargo volume served by the warehouse and the coefficient of uneven loading of the warehouse space.*

**Key words:** *warehouse logistics, technology, area, model, regression.*

**Pavlenko Olexiy**, Ph.D., Assoc. Prof., Department of Transport Technology,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4237-4310>,  
[ttpov@ukr.net](mailto:ttpov@ukr.net),

**Ryzhykov Mykola**, Postgraduate Student,  
Department of Transport Technology, ORCID:  
<https://orcid.org/0009-0005-1421-9171>,

[sonixiomi@gmail.com](mailto:sonixiomi@gmail.com),

**Barmina Daria**, student of the Faculty of Transport Systems,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2991-0741>,  
[barminadasha2020@gmail.com](mailto:barminadasha2020@gmail.com)

Kharkov National Automobile and Highway University,  
25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002,  
Ukraine.

*Стаття надійшла до редакції / Received:*  
08.01.2026.

*Прийнята до друку після рецензування / Revised  
and Accepted:* 15.01.2026.

*Дата публікації статті / Published:* 11.05.2026.