

Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра залізничних станцій та вузлів

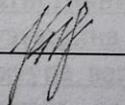
УДОСКОНАЛЕННЯ МІЖНАРОДНИХ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ
ВАНТАЖОПЕРЕВЕЗЕНЬ ЗА УЧАСТЮ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Пояснювальна записка та розрахунки

до кваліфікаційної роботи

УММВЗ.300.00.00.000 ПЗ

Розробив студент групи 213-МКТ-Д24
спеціальності 275 / 275.02 (роботу
виконано самостійно, відповідно до
принципів академічної доброчесності)

 Савелій КОНОНЕНКО

Керівник: доцент, канд. техн. наук

Ганна ШЕЛЕХАНЬ

Рецензент: доцент, канд. техн. наук

Ольга ШАПАТІНА

АНОТАЦІЯ

Дана кваліфікаційна робота включає у себе 15 слайдів презентації, 95 аркушів пояснювальної записки формату А4, що включає 21 рисунок, 13 таблиць, 29 літературних джерел.

Ключові слова: МУЛЬТИМОДАЛЬНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ, ПРИПОРТОВІ СТАНЦІЇ, ІНФРАСТРУКТУРНІ ЕЛЕМЕНТИ, МИТНІ РЕЖИМИ.

Об'єктом дослідження є міжнародні мультимодальні перевезення вантажів за участю залізниці. Предметом дослідження виступає обробка вагонопотоків з міжнародними вантажами на припортових станціях.

Метою роботи є удосконалення міжнародних мультимодальних вантажоперевезень за участю залізничного транспорту за рахунок оцінки ефективності використання припортової станційної інфраструктури та врахування випадковості подачі вагонів у морські порти.

Елементами наукової новизни є вирішення задачі з визначення оптимального числа вагонів з міжнародними вантажами, що обслуговуються на різних інфраструктурних елементах припортової станції з урахуванням ймовірнісного характеру складових технологічного процесу.

У кваліфікаційній роботі проаналізовано сучасний стан міжнародних залізничних перевезень, проведено статистичні дослідження технологічних показників роботи припортових станцій. Виконано аналіз наукових праць за темою роботи. Сформовано та вирішено оптимізаційну задачу у вигляді математичної моделі використання інфраструктурних елементів припортової станції та порту. Визначено економічний ефект на основі впровадження розроблених заходів на наступні 5 років життєвого циклу проєкту.

ABSTRACT

This qualification work includes 15 presentation slides, 95 sheets of explanatory notes in A4 format, including 21 figures, 13 tables, 29 literary references.

Keywords: MULTIMODAL TRANSPORTATION, PORT RAILWAY STATIONS, INFRASTRUCTURE ELEMENTS, CUSTOMS REGIMES.

The object of the study is international multimodal freight transportation involving railway transport. The subject of the study is the handling of railcar flows carrying international cargo at port railway stations.

The purpose of this study is to improve international multimodal freight transportation involving railway transport by assessing the efficiency of port station infrastructure utilization and accounting for the stochastic nature of railcar arrivals at seaports.

The elements of scientific novelty include solving the problem of determining the optimal number of railcars with international cargo handled at various infrastructure elements of a port railway station, taking into account the probabilistic nature of the components of the technological process.

The qualification work analyzes the current state of international railway transportation and conducts statistical studies of the technological performance indicators of port railway stations. An analysis of scientific publications related to the research topic is performed. An optimization problem is formulated and solved in the form of a mathematical model for the utilization of infrastructure elements of a port railway station and port. The economic effect of implementing the developed measures is determined for the next five years of the project life cycle.

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет управління процесами перевезень

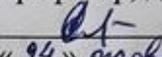
Кафедра залізничних станцій та вузлів

Освітній рівень: магістр

Спеціальність 275 Транспортні технології
275.02 Транспортні технології (на залізничному транспорті)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,
професор, доктор техн. наук

 О. М. Огар
«24» жовтня 2025 р.

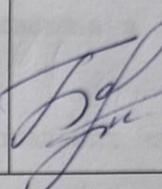
**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Кононенко Савелію Сергійовичу

1. Тема проекту «Удосконалення міжнародних мультимодальних вантажоперевезень за участю залізничного транспорту», керівник Шелехань Ганна Ігорівна, канд. техн. наук, доцент, затверджено розпорядженням факультету УПП від «24» жовтня 2025 р. № 19/25.
2. Строк подання студентом закінченої роботи – «11» січня 2026 року.
3. Вихідні дані до проекту (роботи): статистичний матеріал, зібраний під час проходження практики; техніко-експлуатаційна характеристика залізничної станції О, докладна схема станції, структура вагонопотоку, що надходить на станцію, хронометражні дані спостережень за основними технологічними операціями на станції О; дані про виконання митних операцій з вантажами.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Аналіз методів удосконалення міжнародних мультимодальних вантажоперевезень. Техніко-експлуатаційна характеристика роботи станції. Статистичні дослідження технологічних параметрів вагонопотоків. Заходи з підвищення ефективності мультимодальних вантажоперевезень за участю залізниці. Удосконалення митних процедур з вантажами. Техніко-економічне обґрунтування заходів з удосконалення міжнародних мультимодальних вантажоперевезень.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): об'єкт, предмет, задачі дослідження; мета роботи; аналіз стану мультимодальних вантажоперевезень; схема станції О; статистичний аналіз

показників роботи станції О; математична постановка оптимізаційної задачі; результати проведеного моделювання (2 арк.); графічна інтерпретація результатів оптимізації; заходи з удосконалення митних процедур з вантажами; визначення економічного ефекту; висновки. Загалом 11 аркушів.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультантів	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Визначення економічного ефекту від заходів з удосконалення мультимодальних вантажоперевезень	Євгеній БАЛАКА, канд. екон. наук, доцент		

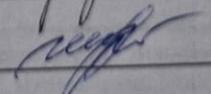
7. Дата видачі завдання «26» жовтня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
Вступ	30. 10. 2025 р.	
Аналіз сучасного стану і методів підвищення ефективності мультимодальних вантажоперевезень	08. 11. 2025 р.	
Статистичні дослідження технологічних параметрів вагопотоків	22. 11. 2025 р.	
Розробка та реалізація оптимізаційної моделі	09.12.2025 р.	
Розробка пропозицій з удосконалення митних процедур	16.12.2025 р.	
Визначення економічного ефекту від заходів з удосконалення мультимодальних вантажоперевезень	23. 12. 2025 р.	
Висновки	04. 01. 2026 р.	
Оформлення роботи	10. 01. 2026 р.	

Здобувач

Керівник

Савелій КОНОНЕНКО

Ганна ШЕЛЕХАНЬ

Зміст

Вступ	6
1 Аналіз сучасного стану мультимодальних вантажоперевезень в Україні	8
1.1 Розвиток мультимодальних перевезень в Україні	8
1.2 Аналіз проблем мультимодальних перевезень в Україні	12
1.3 Роль мультимодальності у розвитку вантажних перевезень України	17
1.4 Порівняльна характеристика мультимодальних перевезень в Україні та Євросоюзі та перспективи їх розвитку	20
1.5 Аналіз наукової літератури за тематикою мультимодальних залізничних перевезень	23
2 Дослідження технологічних показників роботи припортової станції	29
2.1 Техніко-експлуатаційна характеристика припортової станції	34
2.2 Статистичний аналіз технологічних показників роботи припортової станції	37
2.3 Розробка заходів з удосконалення обробки міжнародних вантажопотоків	44
3 Оптимізація процесу обробки вагонів на припортових станціях в умовах мультимодальних перевезень	47
3.1 Формалізація технологічної взаємодії інфраструктурних елементів припортової станції	47
3.2 Математична постановка і рішення задачі удосконалення обробки вагонопотоків на припортових станціях	60
4 Удосконалення технології митного оформлення вантажів	72
5 Оцінка економічної ефективності впровадження заходів	76
5.1 Прогнозування обсягів надходження вагонів на станцію	76

УММВЗ.300.00.00.000 ПЗ					
Змін.	Лист	№ Документу	Підпис	Дата	
Розробив		Кононенко			
Керівник		Шелехань			
Н.Контр.		Шаповал			
Затв		Огар			
Удосконалення міжнародних мультимодальних вантажоперевезень за участю залізничного транспорту			Літ.	Лист	Листів
				4	95
			УкрДУЗТ		4

5.2	Визначення експлуатаційних витрат при впровадженні заходів з удосконалення мультимодальних вантажоперевезень	80
	Висновки	85
	Список використаних джерел	87
	Додаток А Схема припортової станції	91
	Додаток Б Програма реалізації оптимізаційної моделі	92

					УММВЗ.300.00.00.000 ПЗ	Лист
						5
Зм.	Лист	№ Документу	Підпис	Дата		

Вступ

Мультимодальні перевезення сприяють не тільки економії коштів і часу, а й зниженню негативного впливу на довкілля, що робить їх все більш популярним та необхідним інструментом для ефективного транспортування вантажів. Розвиток мультимодальних перевезень є стратегічним завданням для оптимізації транспортування вантажів, як всередині країни, так і в міжнародних ланцюгах постачань.

Актуальність дослідження мультимодальних перевезень за участю залізниці в Україні зумовлена необхідністю інтеграції національної транспортної системи в європейські та глобальні логістичні мережі, що є важливим чинником економічного розвитку країни. В умовах глобалізації та геополітичних викликів, розвиток мультимодальних перевезень дозволяє зменшити залежність від одного виду транспорту, знижуючи витрати й підвищуючи ефективність логістичних процесів, що також відповідає основним положенням розвитку транспортної галузі згідно Національної транспортної стратегії України до 2030 року [1].

Оскільки залізничний транспорт є ключовим елементом у мультимодальних ланцюгах, його роль у забезпеченні стабільності перевезень, зокрема в умовах післявоєнної реконструкції України, є важливою для подальшого економічного зростання та інтеграції в європейську транспортну мережу. Українська залізниця залишається основною складовою логістичної системи, забезпечуючи до 60% та більше вантажних перевезень у національному обігу. Тому тема даної роботи є актуальною.

Метою роботи є удосконалення міжнародних мультимодальних вантажоперевезень за участю залізничного транспорту за рахунок оцінки ефективності використання припортової станційної інфраструктури та врахування випадковості подачі вагонів у морські порти.

Для реалізації поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

- 1) проаналізувати сучасний стан і перспективи міжнародних мультимодальних вантажоперевезень України;
- 2) виконати аналіз сучасних наукових досліджень, присвячених мультимодальним перевезенням за участю залізниці;
- 3) провести статистичні дослідження технологічних параметрів обробки вагонопотоків на припортовій станції;
- 4) розробити та реалізувати оптимізаційну модель мінімізації загального простою вагонів з міжнародними вантажами на припортових станціях;
- 5) розробити пропозиції з удосконалення митного контролю вантажів;
- 6) виконати економічну оцінку ефективності запропонованих заходів.

Об'єктом дослідження є міжнародні мультимодальні перевезення вантажів за участю залізниці. Предметом дослідження виступає обробка вагонопотоків з міжнародними вантажами на припортових станціях.

Елементами наукової новизни є вирішення задачі з визначення оптимального числа вагонів з міжнародними вантажами, що обслуговуються на різних інфраструктурних елементах припортової станції з урахуванням ймовірнісного характеру складових технологічного процесу.

Відповідно до теми кваліфікаційної роботи опубліковано тези доповіді за результатами участі у 85-ій Студентській науково-технічній конференції УкрДУЗТ, 10-11 грудня 2025 р., м. Харків [2]

Висновки

У даній кваліфікаційній роботі було вирішено задачу удосконалення міжнародних мультимодальних вантажоперевезень за участю залізничного транспорту за рахунок оцінки ефективності використання припортової станційної інфраструктури та врахування випадковості подачі вагонів у морські порти. Результати роботи дозволяють зробити наступні висновки.

Аналіз сучасного стану міжнародних мультимодальних вантажних перевезень показав, що залізничний транспорт виступає ключовим елементом мультимодальних маршрутів у комбінації з будь-яким іншим видом транспорту. Відбувається поступове нарощування обсягів експортних та імпорتنих вантажів після настання кризисної ситуації в Україні. Але міжнародні залізничні вантажоперевезення стикаються усе ще з низкою критичних викликів. Основними із них залишаються інфраструктурна несумісність та необхідність уніфікації стандартів з країнами ЄС, адаптація під умови безпекових, економічних та інших ризиків.

Незважаючи на широке висвітлення питань мультимодальних вантажних перевезень у науковій літературі, вони все ще потребують додаткових досліджень. Відкритими залишаються питання розробки заходів із удосконалення технології роботи залізничних станцій та їх взаємодії з морськими портами, ефективного використання рухомого складу, інфраструктури, а також комплексної реформи усіх галузей економіки, покращення нормативно-правової бази, приведення її у відповідність до міжнародних норм.

У результаті статистичних досліджень технологічних показників роботи припортової станції з вагонопотоками було визначено їх середні значення та міру відхилення, величина яких дає можливість зробити висновок про необхідність удосконалення технології роботи станції з метою більш раціонального використання її наявних потужностей і підвищення ефективності обробки міжнародних вагонів.

Розроблена оптимізаційна модель мінімізації тривалості загального простою

вагонів з експортними вантажами на припортовій станції дозволяє розраховувати оптимальне число вагонів, що має обслуговуватися на різних інфраструктурних елементах припортової станції. Модель дозволяє враховувати випадковість подачі вагонів, оцінювати ефективність використання станційної інфраструктури та прогнозувати середній час простою вагонів з експортними вантажами за різних сценаріїв їх експлуатації.

Виконаний аналіз проведення митних операцій з міжнародними вантажами, що надходять на станцію, покладено в основу розробки пропозицій щодо удосконалення митних процедур на припортовій станції.

Економічна оцінка ефективності заходів з удосконалення міжнародних мультимодальних вантажоперевезень за участю залізничного транспорту проведена з урахуванням прогнозованої оцінки обсягів надходження вагонопотоків. У результаті розрахунків сумарний приріст економічного ефекту на розрахунковий п'ятий рік впровадження заходів склав близько 950 тис. грн.

Таким чином, задача з удосконалення міжнародних мультимодальних вантажоперевезень за участю залізничного транспорту вирішена за рахунок оцінки ефективності використання припортової станційної інфраструктури та врахування випадковості подачі вагонів у морські порти та носить науково-прикладний характер.

Список використаних джерел

1. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року : схв. Кабінетом Міністрів України від 30 травня 2018 року №430-р (Офіційний вісник України. 2018, № 16 (30.06.2018)).

2. Кононенко С. С. Аналіз актуальних проблем мультимодальних перевезень вантажів за участю залізниці. 85-а Студентська науково-технічна конференція УкрДУЗТ, 10-11 грудня 2025 р., м. Харків. С. 397-398. URL : https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2025/12/tezi-sntk-85_2025.pdf. (дата звернення: 24.12.2025 р.).

3. Про мультимодальні перевезення : Закон України від 17.11.2021 р. № 1887-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1887-20> (дата звернення: 20.10.2025).

4. Russia increasingly targeting trains as attacks on Ukraine's rail network intensify. URL: <https://www.theguardian.com/world/2025/nov/15/russia-targeting-trains-ukraine-rail-network-attacks?utm>. (дата звернення: 22.11.2025).

5. Банк даних. Діяльність підприємств наземного транспорту. URL: <https://stat.gov.ua/uk/explorer> (дата звернення: 23.10.2025).

6. Prytula Kh., Kalat Ya., Kyryk I. The development of multimodal transportation in Ukraine in the conditions of global trade transformations. *Socio-Economic Problems of the Modern Period of Ukraine*. 2022. 14-21. URL: <https://doi.org/10.36818/2071-4653-2022-4-3>. (дата звернення: 26.10.2025).

7. Мультимодальні перевезення та створення цифрових транспортних коридорів дозволять Україні реалізувати свій транзитний потенціал, - Владислав Криклій. URL: <https://mindev.gov.ua/news/31317-multimodalni-perevezennia-ta-stvorennia-cifrovix-transportnix-koridoriv-dozvolyat-ukrayini-realizuvati-svii-tranzitnii-potencial-vladislav-kriklii?utm>. (дата звернення: 26.10.2025).

8. Лебідь Є. М., Лужанська Н. О., Лебідь І. Г., Мазуренко О. О., Рой М. П. та ін. Розробка імітаційної моделі роботи транспортно-експедиторського підприємства при організації мультимодальних перевезень вантажів. *Eastern-European Journal of*

Enterprise Technologies, 2024. 6(3 (132)), 6–16. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.316568>. (дата звернення: 05.11.2025).

9. Sokolova O., Soloviova O., Borets I., Vysotska I. Development of conceptual provisions to effectively manage the activities of a multimodal transport operator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 1(3 (109)), 38–50. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225522>. (дата звернення: 05.11.2025).

10. Archetti C., Peirano L., Speranza M. Optimization in multimodal freight transportation problems: A Survey. *European Journal of Operational Research*. 2022, Vol. 299, Issue 1. Pp. 1-20. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.07.031>. (дата звернення: 06.11.2025).

11. Prokudin G., Chupaylenko A., Khobotnia T., Remekh I., Lyamzin A., Kovalenko M. Optimizing unbalanced freight deliveries in transportation networks . *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022. 2 (3 (116)). Pp. 22–32. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253791>. (дата звернення: 06.11.2025).

12. Ситнік В. В., Пікуліна О. В. Розвиток мультимодальних перевезень в Україні: економічний та інфраструктурний виміри. *Review of transport economics and management*. 2025. (12(28)), 90–100. URL: <https://doi.org/10.15802/rtem2024/327135>. (дата звернення: 08.11.2025).

13. Petrenko O. I., Korniyko Y. R. The role of transport operators in the organization of multimodal transport. *Business Inform*. 2021. (8), Pp. 61–67. URL: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2021-8-61-67> (дата звернення: 08.11.2025).

14. Мельник М.І., Лещух І.В. Розвиток інфраструктури мультимодальних перевезень в Україні у контексті зміни транспортно-логістичних маршрутів в умовах війни: наукова доповідь (Серія «Проблеми регіонального розвитку»)/ ДУ «Інститут регіональних досліджень імені М.І. Долишнього НАН України». Львів, 2023. 51 с.

15. Ломотько Д.В., Примаченко Г.О. Аналіз розвитку мультимодальних перевезень залізничним транспортом в Україні. *Залізничний транспорт України*. 2023. № 2. С. 15-30.

16. Онищенко С.П., Берестенко В.В. Оптимізація схеми та складу перевізників

мультимодального перевезення. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Том 36 (75), №2. С. 259-265. URL: http://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2025/2_2025/part_1/2-1_2025.pdf#page=269 (дата звернення: 10.11.2025).

17. Кузнєцова К., Ченуша О., Петренко Д. Мультимодальні перевезення як інструмент ефективної міжнародної логістики. *Economic Synergy*. 2022, Issue 1;2 (3;4). URL: <https://doi.org/10.53920/ES-2022-1;2-6> (дата звернення: 12.11.2025).

18. Bessaid A., Bechar H., Fellah M. K. Image analysis and pattern recognition as tools in map interpretation. *Electronic Journal "Technical Acoustics"*. URL: <http://www.ejta.org>, 2003, 15. (дата звернення: 17.11.2025).

19. Canny J. A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1986. Vol. PAMI-8, No. 6. P. 679–698.

20. Шарапов О. Д., Дербенцев В. Д., Семьонов Д. Є. Економічна кібернетика: навч. посібник. К.: КНЕУ, 2004. 231 с.

21. Методичні вказівки з визначення норм часу на маневрові роботи, які виконуються на залізничному транспорті : затв. : наказ Укрзалізниці 25.03.03. № 072-ЦЗ. Київ : Транспорт України, 2003. 96 с.

22. Наконечний С. І., Терещенко Т. О. Економетрія. Київ : КНЕУ, 2006. 528 с.

23. Задачін В. М., Конюшенко І. Г. Чисельні методи : навч. посібник. Х. : Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. 180 с.

24. Пол Беррі. Head First. Python. Видавництво «Фабула», 2021. 624 с.

25. Митний Кодекс України : Закон України від 13.03.2012 р. № 4495–VI : станом на 21 лип. 2021 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4495-17#Text> (дата звернення: 14.12.2025).

26. Про затвердження Порядку надання складським об'єктам статусу «митний склад» та позбавлення такого статусу. Наказ Міністерства фінансів України від 16.07.2012 №835, зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 03.08.2012 за № 1324/21636. Офіційний вісник України, 2012. № 61. С. 135. (20.08.2012).

27. Мочерний С. В., Устенко О. А. Основи економічної теорії: навч. посіб. 3-тє

вид., стер. К.: Академія, 2018. 502 с.

28. Економіка України: стратегія і політика довгострокового розвитку / за ред. Гейця В.М. Київ: Фенікс, 2003. 1008 с.

29. Баб'як М. Н., Пешенкова Л. А., Рибчук А. В. Економічна теорія: навч. посіб. К.: Центр навчальної літератури, 2017. 208 с.

Додаток Б

Програма реалізації оптимізаційної моделі

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D

# Діапазон вагонів
n1 = np.arange(1, 56, 5) # парк приймання
n2 = np.arange(1, 56, 5) # вантажні фронти
N1, N2 = np.meshgrid(n1, n2)

# Стохастична залежність середнього часу простою
T_idle = 10 + 0.02*(N1-25)**2 + 0.03*(N2-30)**2 + np.random.normal(0, 0.3, N1.shape)

# --- Теплова карта ---
plt.figure(figsize=(8,6))
plt.contourf(N1, N2, T_idle, cmap='viridis')
cbar = plt.colorbar(label='Середній час простою, год')
plt.title('Теплова карта середнього часу простою вагонів')
plt.xlabel('Кількість вагонів у парку приймання')
plt.ylabel('Кількість вагонів на вантажних фронтах')
plt.show()

# --- 3D поверхня ---
fig = plt.figure(figsize=(8,6))
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
ax.plot_surface(N1, N2, T_idle, cmap='viridis', edgecolor='none')
ax.set_title('3D поверхня середнього часу простою вагонів')
```

```

ax.set_xlabel('Вагони у парку приймання')
ax.set_ylabel('Вагони на вантажних фронтах')
ax.set_zlabel('Середній час простою, год')
plt.show()

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D

# Параметри
n1 = np.arange(1, 56, 5) # парк приймання
n2 = np.arange(1, 56, 5) # вантажні fronti
N1, N2 = np.meshgrid(n1, n2)

# Стохастична залежність середнього часу простою
T_idle = 10 + 0.02*(N1-25)**2 + 0.03*(N2-30)**2 + np.random.normal(0, 0.3, N1.shape)

# --- Теплова карта ---
plt.figure(figsize=(8,6))
contour = plt.contourf(N1, N2, T_idle, levels=20, cmap='viridis')
cbar = plt.colorbar(contour, label='Середній час простою, год')
plt.title('Теплова карта середнього часу простою вагонів')
plt.xlabel('Кількість вагонів у парку приймання')
plt.ylabel('Кількість вагонів на вантажних фронтах')
plt.tight_layout()
plt.show()

# --- 3D поверхня ---
fig = plt.figure(figsize=(8,6))

```

```

ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
ax.plot_surface(N1, N2, T_idle, cmap='viridis', edgecolor='none')
ax.set_title('3D поверхня середнього часу простою вагонів')
ax.set_xlabel('Вагони у парку приймання')
ax.set_ylabel('Вагони на вантажних фронтах')
ax.set_zlabel('Середній час простою, год')
plt.tight_layout()
plt.show()

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D

# Матриця значень T_idle
Z = np.zeros_like(N1, dtype=float)
for i, x in enumerate(N1_unique):
    for j, y in enumerate(N2_unique):
        subset = data[(data['n_park'] == x) & (data['n_front'] == y)]
        if not subset.empty:
            Z[j, i] = subset['T_idle'].mean() # середнє по стохастичних реалізаціях

# --- Теплова карта ---
plt.figure(figsize=(8,6))
contour = plt.contourf(N1, N2, Z, levels=20, cmap='viridis')
cbar = plt.colorbar(contour, label='Середній час простою, год')
plt.title('Теплова карта середнього часу простою вагонів')
plt.xlabel('Кількість вагонів у парку приймання')
plt.ylabel('Кількість вагонів на вантажних фронтах')
plt.tight_layout()

```

```
plt.show()
```

```
# --- 3D поверхня ---
```

```
fig = plt.figure(figsize=(8,6))
```

```
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
```

```
ax.plot_surface(N1, N2, Z, cmap='viridis', edgecolor='none')
```

```
ax.set_title('3D поверхня середнього часу простою вагонів')
```

```
ax.set_xlabel('Вагони у парку приймання')
```

```
ax.set_ylabel('Вагони на вантажних фронтах')
```

```
ax.set_zlabel('Середній час простою, год')
```

```
plt.tight_layout()
```

```
plt.show()
```