

УДК 656.073:004.942

О. Г. ТІГОВ^{1*}, О. О. МАЗУРЕНКО^{2*}

^{1*}Каф. «Транспортні вузли», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373-15-12, ел. пошта: aleksej.tigov@gmail.com, ORCID 0009-0003-6193-4915

^{2*}Каф. «Транспортні вузли», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373-15-12, ел. пошта o.o.mazurenko@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-5591-1790

МОДЕЛЮВАННЯ ПОТЕНЦІЙНИХ ПОТОКІВ КОНТЕЙНЕРІВ ТЕРИТОРІЄЮ УКРАЇНИ

Мета. Контейнерні транспортно-логістичні лінії у глобальних ланцюгах постачання є результатом інтеграції морського та наземного транспорту. Це твердження набуває особливої актуальності для України. Наша країна має прямий вихід до Чорного моря, яке є частиною системи сполучення зі Світовим океаном. Унікальне геополітичне положення України, розташованої на перетині ключових наземних шляхів Євразійського континенту та з доступом до Світового океану, створює сприятливі умови для розвитку великих контейнерних хабів. Це, в свою чергу, відкриває значні перспективи для залучення суттєвої частки глобальних контейнерних потоків між країнами Азії та Європи. Метою даного дослідження є розробка гравітаційних моделей для аналізу та прогнозування потенційних контейнерних потоків через територію України. **Методи.** В процесі дослідження використано метод гравітаційного моделювання, який вважається одним із найпростіших способів прогнозування. Хоча цей метод поступається в точності альтернативним підходам, але він залишається ефективним за умов обмежених дослідницьких ресурсів і допустимості певних похибок. У таких випадках гравітаційні моделі часто використовуються як основний інструмент аналізу. Зважаючи на складність і обмежену доступність інформації, характерну для оцінки глобальних ланцюгів постачання, застосування гравітаційного підходу для прогнозування потенційних контейнерних потоків через територію України видається доцільним. **Результати.** За допомогою розробленої гравітаційної моделі визначено потенційні потоки контейнерів між основними економічними регіонами світу. Модель є оптимізаційною задачею лінійного програмування, де критерієм оптимальності виступає мінімізація дисперсії відхилень між розрахунковими та статистичними даними обсягів відправлень і прибуття контейнерів. Моделювання показало, що потенційно територією України може проходити: 1) у напрямку Східної Азії до країн Єврозони – до 112,9 млн TEU на рік; 2) у зворотному напрямку, з країн Єврозони до Східної Азії – до 99,9 млн TEU на рік. **Наукова новизна.** Вперше застосовано оптимізаційну гравітаційну модель для прогнозування потенційних контейнерних потоків через територію України в умовах обмеженої доступності інформації та ресурсів. **Практична значимість.** Розроблені математичні моделі дозволяють на практиці на основі відкритих даних сформувати потенційні потоки контейнерів для будь-якого регіону планети.

Ключові слова: мультимодальні перевезення, контейнерні перевезення, гравітаційна модель, кореспонденція вантажопотоків, оптимізаційна задача лінійного програмування.

Вступ

Перевезення у контейнерах залишається одним із найбільш доступних та популярних способів доставлення широкої номенклатури вантажів у світі. Особливої цінності даний спосіб перевезення досяг в період розвитку глобальної економіки ХХ сторіччя [1-4].

Однак тільки із розвитком мультимодальних ланцюгів постачання, а саме контейнерних перевезень, на межі 80-х – 90-х років минулого сторіччя з'явилася можливість переходу світової економіки на новий, реально глобальний етап розвитку. Однією з тенденцій розвитку вантажних перевезень у трансконтинентальному середовищі є їх контейнеризація, яка здійснюється прискореними темпами [5]. Країни так званого «західного світу» на той час з найбільш

розвиненими економіками, почали масового переносити свої виробничі потужності у інші частини світу. З одного боку такі кроки були можливі завдяки сприянню політичних і економічних умов в таких країнах як Китай, В'єтнам, Індія, Тайланд, Південно-Африканська республіка, Аргентина, Бразилія, Уругвай та інші [6]. Однак, більш важливою умовою розвитку міжнародних корпоративних відносин став стрімкий розвиток контейнерних транспортно-технологічних ліній та обсягів міжнародних контейнерних перевезень. Станом на середину 2024 року ринок контейнерних перевезень досяг 119,68 млрд. доларів США, і за даними [7] до 2029 року досягне розміру 145,70 млрд. доларів США із середньорічними темпами зростання у 4,07% [8-10]. Зрозуміло, що ключовим для України є питання, яку частку світових транзитних

потоків контейнерів може обслуговувати Національна транспортна система України.

Постановка завдання дослідження

Завданням дослідження є оцінка потенційних потоків контейнерів, які можуть бути перевезені територією України.

Мета дослідження

Метою дослідження є розробка гравітаційної моделі формування потоків контейнерів глобальних ланцюгів постачання та визначення потенційних потоків контейнерів, що можуть бути освоєні в Україні.

Аналіз досліджень і публікацій

У роботі [11] пропонується ефективний підхід до моделювання паралельних потоків процесів з використанням двофазних серверів. Для цього використовується метод аналізу наближеного середнього значення та метод агрегації та дезагрегації мереж. Однак такий підхід не може бути використаним для імітації просування контейнерних потоків залізницями України через неможливість урахування конфігурації залізничної мережі. У роботі [12] для аналізу та імітації транспортних потоків використовуються марковські процеси. Хоча цей підхід дозволяє моделювати великомасштабні транспортні мережі, він не враховує особливості організації контейнерних перевезень, таких як специфіка формування контейнерного поїзда. У роботі [13] акцент зроблено на використанні аналітичного ймовірнісного моделювання транспортних потоків. Такий тип моделі є масштабованою та ефективною, але вона не враховує окремі обмеження реальних транспортних мереж. У роботі [14] для моделювання потоків у динамічних системах пропонується застосування теорії точкових процесів, зокрема процес Гокса. Це дає нові можливості для побудови більш реалістичних моделей, за допомогою яких можливо оптимізувати використання інфраструктури та прогнозувати можливі затримки або перевантаження системи. У роботі [15] пропонується стохастична модель транспортного потоку, яка враховує випадкові коливання інтенсивності руху. Ця модель дозволяє враховувати випадковість у транспортних потоках, але не дозволяє враховувати фактори, які впливають на формування контейнерних потоків на залізниці.

Таким чином постає питання розробки моделі, яка б дозволяла досліджувати формування та просування потоків контейнерів глобальних

ланцюгів постачання та визначати їх параметри.

Основний матеріал дослідження

Гравітаційні моделі широко застосовуються в транспортних технологіях для прогнозування потоків пасажирів або вантажів, особливо на розгалужених мережах із численними пунктами відправлення та призначення.

Гравітаційне моделювання вважається одним із найпростіших способів прогнозування, хоча й поступається в точності іншим методам. Проте, за умов обмежених дослідницьких ресурсів і допустимості певних похибок, цей метод часто використовується як основний [16], [17].

Сутність методу гравітаційного моделювання полягає у використанні двох елементів тяжіння, які створюють потенційну силу взаємозв'язку між ними. У контексті транспортних потоків такими силами тяжіння можуть бути загальна чисельність населення, що проживає в певних пунктах, або потенційний обсяг вантажу, який формується в місці відправлення.

З огляду на складність і обмежену доступність інформації при оцінці глобальних ланцюгів постачання, доцільно застосувати гравітаційний метод прогнозування для аналізу потенційних потоків контейнерів територією України.

Для моделювання потоків контейнерів були використані дані офіційної статистики Світового Банку [18]. Відповідно до цих даних на три регіони планети припадає близько 80% формувань всіх світових відправлень контейнерів через морські торговельні порти (рис. 1):

- 1) країни Східної Азії та Азіатсько-Тихоокеанського регіону;
- 2) країни Північної Америки;
- 3) країни Єврозони;
- 4) інші регіони світу

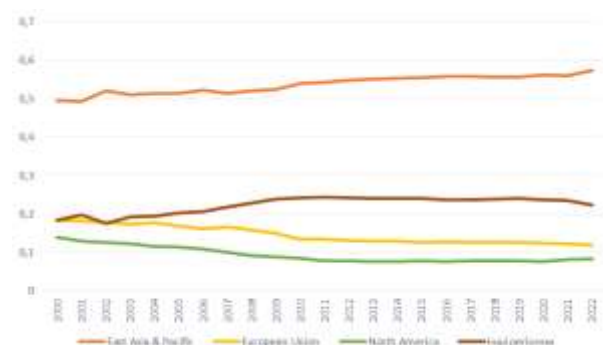


Рис. 1. Динаміка частки обсягу прибуття та відправлення контейнерів (TEU) у морських торговельних портах по найбільших (за обсягом показника) регіонах Світу за 2000-2022 р.

За загальним виразом, гравітаційна складова моделі матиме наступний вираз:

$$f_{ij} = \eta_{\text{норм}} \frac{GDP_i GDP_j}{r_{ij}}, \quad (1)$$

де GDP_i, GDP_j – обсяг ВВП i -го та j -го регіонів за звітний період;

r_{ij} – відстань між i -м та j -м регіоном;

$\eta_{\text{норм}}$ – коефіцієнт нормування відхилень.

Розрахунковий обсяг потоку контейнерів буде формуватися як частка від загального, що забирається відповідною «силою» між двома регіонами формування ВВП. Тоді, відповідно до (1), його розмір визначатиметься як:

$$Nk_{ij} = Nk_{\text{заг}} \eta_{\text{норм}} \frac{GDP_i GDP_j}{r_{ij}}, \quad (2)$$

де $Nk_{\text{заг}}$ – загальносвітовий потік контейнерів.

Враховуючи той факт, що відстань між трьома основними регіонами формування економічної активності планети – країнами Східної Азії, Північної Америки та Єврозони – в масштабах планети приблизно однакові, коефіцієнтами відстані r_{ij} можна знехтувати та прирівняти до 1. Тоді залежність (2) матиме наступний вигляд:

$$Nk_{ij} = Nk_{\text{заг}} \eta_{\text{норм}} GDP_i GDP_j, \quad (3)$$

Для можливості оптимізації (максимізації) точності встановлення кореспонденції, було створено оптимізаційну функцію. Сутність

оптимізації зводиться до зниження до мінімуму дисперсії відхилень розрахункових сум обсягів відправлення та прибуття контейнерів по всіх основних регіонах формування:

$$D_{ij} = \left(\sum_{i=1}^I (Nk_{\text{розр}})_i - Nk_{\text{заг}i} \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^J (Nk_{\text{розр}})_j - Nk_{\text{заг}j} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

при обмеженнях:

$$\begin{cases} (Nk_{\text{розр}})_{ij} \geq 0; \\ (Nk_{\text{розр}})_{ii} = 0; (Nk_{\text{розр}})_{jj} = 0; \\ (Nk_{\text{розр}})_{ij} \rightarrow \text{ціле}, \end{cases} \quad (5)$$

де i – множина регіонів відправлення контейнерів;

j – множина регіонів призначення контейнерів.

Зазначена задача (1–4) з урахуванням обмежень (5) є задачею лінійного програмування, яку можна вирішити за допомогою симплекс-методу. Вирішення задачі виконано в середовищі MS Excel з використанням вбудованого модуля «Пошук рішення».

На основі даних [18] та рис. 1 сформовано матрицю потенційних гравітаційних складових (табл. 1).

Таблиця 1

Базова матриця потенційних гравітаційних складових f_{ij} , млрд USD ВВП

Регіони призначення \ Регіони відправлення	Східна Азія	Північна Америка	Єврозона	Інші регіони	Разом, $(Nk_{\text{розр}})_i$
Східна Азія	1,0	5350,1	3565,1	6240,1	15156,3
Північна Америка	5405,4	1,0	1998,3	4054,2	11459,0
Єврозона	3153,5	2351,0	1,0	2351,7	7857,2
Інші регіони	5129,1	4054,2	2033,9	1,0	11218,2
Разом, $(Nk_{\text{розр}})_i$	13689,0	11756,3	7598,3	12647,0	45690,7

Під час оцінки дисперсії відхилень між розрахунковими та фактичними значеннями валового внутрішнього продукту за регіонами встановлено, що значення стандартного відхилення становить:

$$\sigma k_{\text{розр}} = \sqrt{Dk_{\text{розр}}} = 1535.035 \quad (6)$$

Такий результат свідчить про низьку ймовірність відносної похибки для такого типу задач (імовірність похибки менше 0,10) та високу достовірність отриманих даних.

В результаті отримана наступна кореспонденція розрахункових потоків контейнерів між визначеними регіонами (табл. 2).

**Розрахункові вантажопотоки контейнерів між основними регіонами економічної активності світу,
млн TEU**

Регіони призначення Регіони відправлення	Східна Азія	Північна Америка	Євразія	Інші регіони	Разом, ($Nk_{розр}$) _i
Східна Азія	0,0	169,4	112,9	197,6	480,0
Північна Америка	171,2	0,0	63,3	128,4	362,9
Євразія	99,9	74,5	0,0	74,5	248,8
Інші регіони	162,4	128,4	64,4	0,0	355,3
Разом, ($Nk_{розр}$) _i	433,5	372,3	240,6	400,5	1446,9

Відповідно до даних табл. 2, можна зробити висновок, що потенційними потоками контейнерів, які можуть проходити через територію України та бути освоєними Українською транспортною системою (станом на середину 2024 р.), є такі:

1) з країн Східної Азії до країн Євразії — до 112,9 млн TEU на рік;

2) з країн Євразії до країн Східної Азії — до 99,9 млн TEU на рік.

Загальний обсяг контейнерів, за даними 2022 року, потенційно міг становити до 212,8 млн TEU на рік.

Наукова новизна

Вперше застосовано оптимізаційну гравітаційну модель для прогнозування потенційних контейнерних потоків через територію України в умовах обмеженої доступності інформації та ресурсів. Запропонована модель, побудована як задача лінійного програмування з критерієм оптимальності у вигляді мінімізації дисперсії відхилень між розрахунковими та статистичними даними, є новим підходом до оцінки глобальних ланцюгів постачання.

Висновки

За допомогою розробленої гравітаційної моделі визначено потенційні потоки контейнерів між основними економічними регіонами світу. Модель є оптимізаційною задачею лінійного програмування, де критерієм оптимальності виступає мінімізація дисперсії відхилень між розрахунковими та статистичними даними обсягів відправлень і прибуття контейнерів.

Моделювання показало, що потенційно територією України може проходити:

1) з країн Східної Азії до країн Євразії — до 112,9 млн TEU на рік;

2) у зворотному напрямку, з країн Євразії до Східної Азії — до 99,9 млн TEU на рік.

За даними 2022 року потенційний загальний оборот контейнерів територією України міг становити до 212,8 млн TEU на рік, що суттєво перевищує фактичний обсяг перевезень контейнерів, та свідчить про неповне використання можливостей країни свого транзитного потенціалу.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Myronenko V., Matsiuk V. Rational distribution of the high-speed railway capacity between trains of various categories. *Transport Economics and Logistics*. 2018. Vol. 76. P. 95–100. URL: <https://doi.org/10.26881/etil.2018.76.07>
2. Matsiuk V., Vasilova H. Rational areas of combined transport technologies application for container delivery on the Caspian-Black sea route of the new Silk Road. *Transport Economics and Logistics*. 2018. Vol. 76. P. 115–121. URL: <https://doi.org/10.26881/etil.2018.76.10>
3. Matsiuk V., Yurchenko O. Mathematical model for assessing the reliability of cargo delivery on the Caspian-Black sea route of the new Silk Road. *Transport Economics and Logistics*. 2018. Vol. 76. P. 107–114. URL: <https://doi.org/10.26881/etil.2018.76.09>
4. Мацюк В.І., Мироненко В.К., Кацман М.Д., Технологічна надійність залізничних транспортних систем: монографія. Київ: ТПК «Орхідея», 2021. 380 с.
5. Yaruta A. M. Current problems and prospects of the development of container freight transportation in world ports: technological aspect. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2022. No. 6. P. 264–272. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/43>
6. Rodrik D. How to Smooth US-China Economic Relations for the Benefit of the Global Economy: A Light Model of Global Economic Governance. *Journal of Government and Economics*. 2024. P. 100097. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jge.2024.100097>
7. Контейнерные перевозки Размер Рынка | Mordor Intelligence. *Market Research Company - Mordor Intelligence™*.

URL: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/global-container-shipping-market>

8. Ломотько Д. В., Нестеренко О. О. Удосконалення транспортно-експедиторської роботи з контейнерними вантажами. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. Т. 29, № 1. С. 3–13. URL: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i1.300874>

9. Multimodal transportation as a basic segment of the transit potential of Ukraine / P. B. Вернигора et al. *Transport systems and transportation technologies*. 2017. No. 14. P. 20–29. URL: <https://doi.org/10.15802/tstt2017/123148>

10. Мультимодальні та інтермодальні перевезення: теорія та практика державного регулювання: монографія / С.В. Ільченко та ін. Одеса: НАН України, 2020. 284 с.

11. Stochastic modeling of parallel process flows in intra-logistics systems: Applications in container terminals and compact storage systems / G. L. Kumawat et al. *European Journal of Operational Research*. 2021. Vol. 290, no. 1. P. 159–176. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.08.006>

12. Large-scale simulation of traffic flow using Markov model / R. Besenczi et al. *PLOS ONE*. 2021. Vol. 16, no. 2. P. e0246062. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246062>

13. Lu J., Osorio C. On the approximation of queue length distributions in large-scale urban networks. *arXiv*, 2021. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.07129>

14. Прохоров В. М. Застосування теорії точкових процесів для моделювання транспортних потоків в залізничних системах. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2025. Т. 30, № 1. С. 14–21.

URL: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v30i1.326782>

15. Jabari S. E., Liu H. X. A stochastic model of traffic flow: Theoretical foundations. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2012. Vol. 46, no. 1. P. 156–174.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.09.006>

16. Estimating intercity heavy truck mobility flows using the deep gravity framework / Y. Yang et al. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2023. Vol. 179. P. 103320.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103320>

17. Alexander D. W., Merkert R. Applications of gravity models to evaluate and forecast US international air freight markets post-GFC. *Transport Policy*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.04.004>

18. World Development Indicators | Data Catalog. *Data Catalog*. URL: <https://datacatalog.worldbank.org/search/dataset/0037712>

Надійшла в редколегію 10.05.2025

Прийнята до друку 05.07.2025

О. ТИHOV, О. MAZURENKO

SIMULATION OF POTENTIAL FLOWS OF CONTAINERS THROUGH THE TERRITORY OF UKRAINE

Purpose. Container transport and logistics lines in global supply chains are the result of the integration of sea and land transport. This statement is of particular relevance for Ukraine. Our country has direct access to the Black Sea, which is part of the system of communication with the World Ocean. The unique geopolitical position of Ukraine, located at the intersection of key land routes of the Eurasian continent and with access to the World Ocean, creates favorable conditions for the development of large container hubs. This, in turn, opens up significant prospects for attracting a significant share of global container flows between the countries of Asia and Europe. The purpose of this study is to develop gravity models for analyzing and forecasting potential container flows through the territory of Ukraine. **Methods.** The research used the gravity modeling method, which is considered one of the simplest forecasting methods. Although this method is inferior in accuracy to alternative approaches, it remains effective under conditions of limited research resources and tolerance of certain errors. In such cases, gravity models are often used as the main analysis tool. Given the complexity and limited availability of information typical for assessing global supply chains, the use of the gravity approach to forecast potential container flows through the territory of Ukraine seems appropriate. **Results.** Using the developed gravity model, potential container flows between the main economic regions of the world were determined. The model is an optimization problem of linear programming, where the optimality criterion is the minimization of the variance of deviations between the calculated and statistical data on the volumes of container departures and arrivals. The modeling showed that potentially the territory of Ukraine can pass: 1) in the direction of East Asia to the Eurozone countries - up to 112.9 million TEU per year; 2) in the opposite direction, from the Eurozone countries to East Asia - up to 99.9 million TEU per year. **Scientific novelty.** For the first time, an optimization gravity model was applied to predict potential container flows through the territory of Ukraine under conditions of limited availability of information and resources. **Practical significance.** The developed mathematical models allow, in practice, based on open data, to form potential container flows for any region of the planet.

Keywords: multimodal transportation, container transportation, gravity model, cargo flow correspondence, linear programming optimization problem.