УДК 656.613

К.М. КЛЕВЦОВ, А.В. БУКЕТОВ, О.В. ШАРКО, О.О. САПРОНОВ,
Г.Ю. ВАСИЛЬЧЕНКО, В.В. СОЦЕНКО
Херсонська державна морська академія

МОДЕЛЮВАННЯ МОРСЬКИХ ТРАНСПОРТНИХ СХЕМ УКРАЇНИ В СУЧАСНИХ УМОВАХ НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО АНАЛІЗУ

На основі аналізу сучасного стану морських транспортних перевезень України розроблено нові варіанти транспортних схем доставки вантажів, знаючи початковий та кінцевий пункти. Описано маршрути перевезень із використанням декількох видів транспорту. Розглянуто пропозицію України із внесення змін до існуючих систем розподілу руху «Підходи до портів Одеса та Іллічівськ» і «Між портами Одеса та Іллічівськ» шляхом поєднання їх у єдину систему розподілу руху «Підходи до портів Чорноморськ, Одеса та Південний».

Оновлена системи розподілу руху встановлює найбезпечніші маршрути в найглибших водах для суден, що прямують до та з українських портів Чорноморська, Одеси, Південного, а також у напрямку Миколаївського та Херсонського портів. Системи розподілу руху спроєктовано так, щоб спростити схеми руху транспортних потоків у зонах сходження/розходження і оптимальним способом організувати рух суден, що заходять/виходять із трьох портів – Чорноморська, Одеси та Південного.

Аналіз наявної теорії математичного аналізу дозволив припустити, що для нас оптимальною є транспортна гравітаційна модель. Вона описує взаємодію між просторовими об'єктами за допомогою математичного аналізу транспортних потоків, в її основі лежить аналогія з ньютонівським законом усесвітнього тяжіння, який зв'язує силу притягнення між двома тілами різної маси та відстані між ними.

Розроблена транспортна гравітаційна модель пов'язує інтенсивність транспортного потоку з його обсягом відправлень, чи переміщень з одного району визначеного обсягу відправлень, які досягли району призначення, з витратами на переміщення.

Проведене дослідження дозволить отримати можливість застосування гравітаційної моделі й апарату розрахунку кореспонденцій для розроблення імітаційної моделі вантажообігу в морській транспортній системі України. Методика, що використовується, відкриває нові можливості для вирішення групи прогнозних завдань – як-от визначення оптимальної кількості суден, визначення найбільш завантаженого порту на лінії, кількість вантажів, що перевозяться, і часу доставки.

Ключові слова: *вантажообіг, гравітаційна модель, транспортні схеми, транспортні перевезення.*

K.M. KLEVTSOV, A.V. BUKETOV, O.V. SHARKO, O.O. SAPRONOV,
G.YU. VASYLCHENKO, V.V. SOTSENKO
Kherson State Maritime Academy

MODELIZATION OF MARITIME TRANSPORT SCHEMES OF UKRAINE IN MODERN CONDITIONS BASED ON MATHEMATICAL ANALYSIS

Based on the analysis of the current state of maritime transport in Ukraine, new options for cargo delivery schemes have been developed, knowing the starting and ending points. Transportation routes using several modes of transport have been described. Ukraine's proposal to amend the existing traffic distribution systems "Approaches to the ports of Odesa and Illichivsk" and "Between the ports of Odesa and Illichivsk" by combining them into a single traffic distribution system "Approaches to the ports of Chornomorsk, Odesa and Pivdenny" has been considered. The updated traffic distribution system establishes the safest routes in the deepest waters for vessels heading to and from the Ukrainian ports of Chornomorsk, Odesa, Pivdenny, as well as towards the ports of Mykolaiv and Kherson. Traffic distribution systems are designed in such a way as to simplify the traffic flow patterns in the convergence/divergence zones and to organize the movement of vessels entering/exiting three ports – Chornomorsk, Odesa and Pivdennyi in the most optimal way.

Analysis of the existing theory of mathematical analysis suggested that in our case the most optimal is the transport gravity model. It describes the interaction between spatial objects in the form of a mathematical analysis of transport flows, it is based on an analogy with Newton's law of universal gravitation, which connects the force of attraction between two bodies of different masses and the distance between them.

The developed transport gravity model connects the intensity of the transport flow with its volume of shipments, or movements from one area of a certain volume of shipments that have reached the destination area with the costs of movement.

The conducted research will allow to use the gravity model and the correspondence calculation apparatus to develop a simulation model of cargo turnover in the maritime transport system of Ukraine. The methodology used opens up new opportunities for solving a group of forecasting tasks – such as determining the optimal number of vessels, determining the busiest port on the line, the number of transported cargoes, and delivery time.

Key words: *cargo turnover, gravity model, transport schemes, transport.*

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-7

Постановка проблеми

У виборі варіантів транспортних схем необхідно дотримуватись такої вимоги: у мультимодальних перевезеннях мають брати участь декілька видів транспорту, як-от морський (обов'язково), залізничний і автомобільний транспорт.

Перш ніж розпочати подальші розрахунки, варіанти транспортних схем і таблиці з відстанями треба узгодити з міжнародними організаціями, партнерами та пріоритетами України.

Останнім часом широкомасштабна російська агресія проти України дозволила відкрити нові можливості мережі TEN-T та посилила переговорні процеси щодо зміни політики ЄС у Регламенті (ЄС) № 1315/2013, які обговорювалися на початку вторгнення. Нарешті Європейська комісія внесла зміни до індикативних карт Транс'європейської морської транспортної мережі, включила до неї українські логістичні маршрути [1].

Натепер Україні пропонували розробити нові логістичні маршрути, а саме:

– Балтійсько-Чорноморсько-Егейський коридор: Львів, Чернівці (Румунія і Молдова) до Одеси;

– Північно-Балтійський коридор через Львів і Київ до окупованого (поки що) Маріуполя;

– Балтійське море – Адріатичне море та місто Рейн – Дунай, проходитимуть через місто Львів.

Також Єврокомісія ввела санкції щодо обмеження використання TEN-T російських і білоруських маршрутів, а також скасувала транспортні маршрути на території ЄС на кордонах із цими країнами-агресорками.

Необхідно констатувати, що загальновизнаних методів оцінювання ймовірності надзвичайних ситуацій (далі – НС) на морських суднах в умовах воєнного стану немає. Отже, методологія управління ризиком НС на морі має недоліки, що перешкоджають здійсненню процедури управління. Дані недоліки стали джерелом суперечностей, з одного боку, між необхідністю мінімізації ризику виникнення НС на морських суднах, з іншого – неналежним розвитком відповідної методичної бази.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Міжнародна морська організація (далі – IMO) схвалила пропозицію України із внесення змін до існуючих систем розподілу руху «Підходи до портів Одеса та Іллічівськ» і «Між портами Одеса та Іллічівськ» шляхом поєднання їх у єдину систему розподілу руху «Підходи до портів Чорноморськ, Одеса та Південний» [2–4].

Морські судна діють в агресивному середовищі.

Стан цього середовища та складність навігаційної ситуації можуть змінюватися в широкому діапазоні. Таку ж динаміку має і ймовірність виникнення НС, джерелом якої є навігаційна аварія. У діяльності ерготехнічної системи «судно – судноводій – середовище» ключове місце належить людському елементу – судноводію, який безпосередньо відповідає за безпеку мореплавання. Його правильні рішення та дії можуть запобігти НС. Навпаки, помилка в судноводінні, якої припустилися в тих же умовах, може призвести до НС. Отже, для мінімізації ризику надзвичайної ситуації, джерелом якої є навігаційна аварія, спочатку необхідно оцінити вплив людського чинника на безпеку мореплавання. У зв'язку із цим гіпотеза дослідження була сформульована так: імовірність надзвичайної ситуації на морських суднах, яка може стати наслідком навігаційної аварії, та ймовірність навігаційної аварії функціонально залежні від ефективності взаємодії елементів ерготехнічної системи «судно – судноводій – середовище».

Ухвалена IMO пропозиція вносить окремі зміни до наявних частин системи розподілу руху (далі – СРР) з метою підвищення рівня безпеки судноплавства й усунення розбіжностей між СРР, що діяли на національному рівні, та СРР, ухваленою IMO в 1981 р. (рис. 1). Зміни також оновлюють такі дані, як система координат WGS 84, назва СРР, нумерація та назви частин СРР, назви деяких портів, морські навігаційні карти (рис. 2).

Оновлена СРР встановлює найбезпечніші маршрути в найглибших водах для суден, що прямують до та з українських портів Чорноморську, Одеси, Південного, а також у напрямку

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-7

Миколаївського та Херсонського портів. СРР спроєктовано таким чином, щоб спростити схеми руху транспортних потоків у зонах сходження/розходження і оптимальним способом організувати рух суден, що заходять/виходять із трьох портів – Чорноморська, Одеси та Південного (рис. 3).

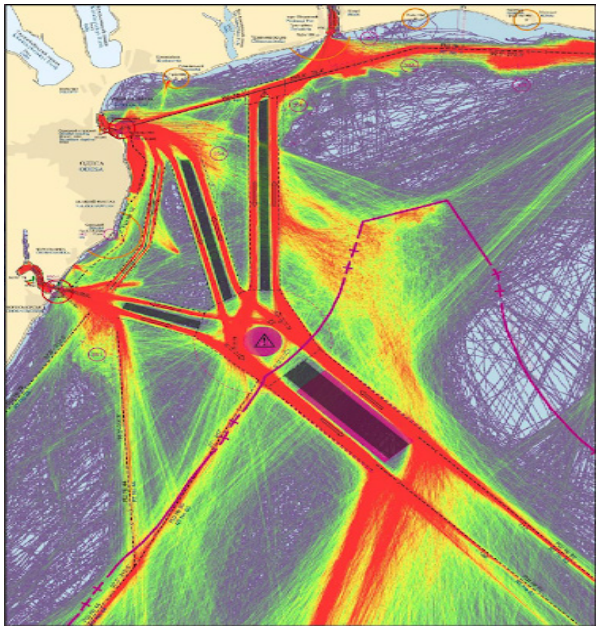

Рис. 1. Схема руху суден у районі СРР «Підходи до портів Чорноморськ, Одеса та Південний», за даними Автоматичної ідентифікаційної системи (АІС) [4]

Ухвалені зміни також ураховують рекомендації щодо встановлення шляхів руху суден, надані Консультативною місією ІМО, яка відвідала Україну у 2019 р., за результатами обов'язкового аудиту України ІМО.

Зміни до СРР «Підходи до портів Чорноморськ, Одеса та Південний» набули чинності через шість місяців від їх ухвалення Комітетом з безпеки на морі ІМО, тобто з 1 червня 2023 р.

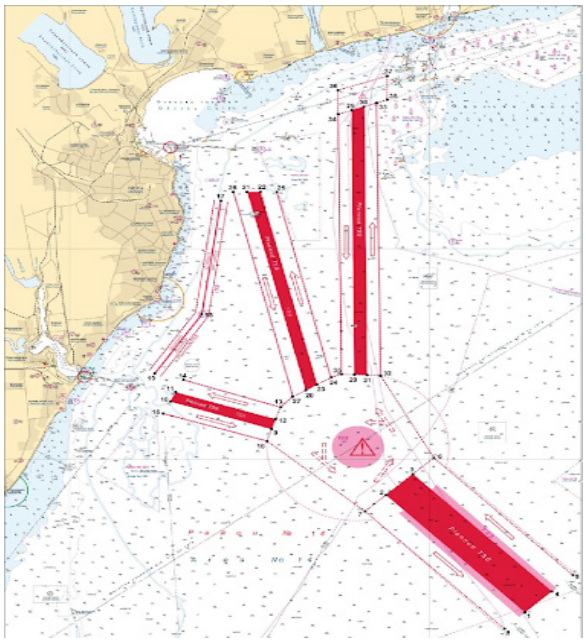

Рис. 2. Зміни, що впроваджуються до СРР «Підходи до портів Чорноморськ, Одеса та Південний» [4]

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-7

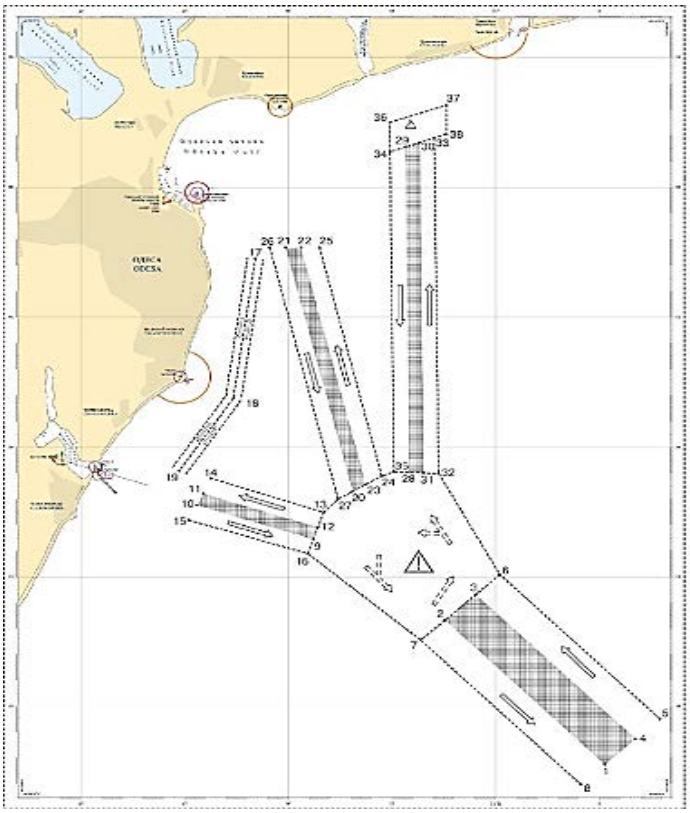

Рис. 3. Оновлена СРР «Підходи до портів Чорноморськ, Одеса та Південний» [4]

Адміністрація судноплавства спільно з Держгідрографією виконує роботу з оцінювання та перегляду системи установлення шляхів руху суден, адже ухвалена Міністерством інфраструктури України процедура передбачає безперервний регулярний процес оцінювання ефективності та перегляду установлених шляхів руху суден у територіальному морі та виключній (морській) економічній зоні України для постійного моніторингу та виявлення всіх чинників, що можуть впливати на безпеку мореплавства, та виконання коригувальних дій для їх усунення шляхом удосконалення установлених шляхів руху суден у водах України [4].

Мета дослідження

У зв'язку із ситуацією, що склалася, необхідно провести моделювання морських транспортних схем України в сучасних умовах до існуючих частин СРР на основі математичного аналізу.

Виклад основного матеріалу дослідження

Аналіз наявних теорій математичного аналізу [5] показав, що панівною теорією гравітації була теорія Ньютона. Натепер більшість фізиків основною теорією гравітації вважають загальну теорію відносності, оскільки весь наявний масив експериментів і спостережень узгоджується з нею. Однак загальна теорія відносності має низку суттєвих проблем, що призводить до спроб її модифікації або до подання нових теорій. Сучасні теорії гравітації можна розбити на такі основні класи:

– неметричні теорії на кшталт теорії Ейнштейна – Картана;
– скалярно-тензорні теорії;
– теорії, альтернативні класичній теорії Ньютона, гравітація;
– теорії поєднання різних фізичних взаємодій, надгравітації;
– метричні теорії;

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-7

– векторні теорії;
– теорії квантової гравітації.

У результаті розгляду теорії математичного аналізу ми можемо припустити, що для нас оптимальною є транспортна гравітаційна модель [5].

Вантажообіг у контейнерах морської транспортної схеми України може бути описаний за допомогою різних методів:
– аналітичного методу;
– апаратом теорії орієнтованих графів;
– апаратом матриць кореспонденції;
– імітаційним моделюванням.

Головним недоліком аналітичних методів, що застосовуються, є те, що вони дозволяють як вихідні параметри враховувати тільки ймовірнісні розподіли, а результуючими даними є тільки середні величини показників. Проте морські перевезення є складною системою, характеристики якої підпорядковуються ймовірнісними розподілами.

Зазвичай прибуття судна в порт не є випадковою величиною протягом тривалого часу, воно визначається чітким розкладом. Також існують форс-мажорні обставини, пов'язані з відмовою обладнання, погіршенням погодних умов, мінуванням морських шляхів тощо. Ці обставини не можуть бути враховані в аналітичному розрахунку морських транспортних схем України в сучасних умовах. Однак їх можна враховувати під час використання імітаційного моделювання.

Опис математичної моделі

Гравітаційна модель описує взаємодію між просторовими об'єктами у вигляді математичного опису транспортних потоків.

В основі гравітаційної моделі транспортних потоків лежить аналогія з ньютонівським законом усесвітнього тяжіння, який зв'язує силу притягнення F_{ij} між двома тілами масою m_1 і m_2 та відстанню L_{ij} між ними (1) [5]:

$$F_{ij} = G\frac{m_1 m_2}{L_{ij}^2}, \tag{1}$$

де: G – гравітаційна постійна.

Транспортна гравітаційна модель пов'язує інтенсивність транспортного потоку T_{ij} з його обсягом Q_i відправлень, чи переміщень з району i обсягом D_j відправлень, які досягли району j, із витратами на переміщення C_{ij} (2) [5].

$$T_{ij} = K\frac{Q_i D_j}{C_{ij}}, \tag{2}$$

де: K – калібрований коефіцієнт;
$i = 1\ldots N$; $j = 1\ldots M$.

Порівняння рівнянь (1) і (2) виявляє квадратичний член у рівнянні (1). Для їх спільного використання вводимо припущення і обмеження у вигляді заходів щодо безпеки проходження акваторією переміщуваних об'єктів [5].

$$\sum_{i=1}^{N} T_{ij} = D_j, \quad \forall_j = 1\ldots M,$$

$$\sum_{i=1}^{N} Q_i = \sum_{j=1}^{M} D_j.$$

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-7

Замінимо квадрат відстані на інтенсивність транспортного потоку, яка в ньютонівському законі всесвітнього тяжіння є функцією тяжіння, зробимо усереднення за параметрами обох моделей, отримаємо модифіковану гравітаційну модель проходження об'єктів, що рухаються в символічному вигляді [5]:

$$T_{ij} = A_i B_j Q_i D_j \left(C_{ij}\right),$$

де: i = 1… N; j = 1… M;
$A_i B_j$ – калібрований коефіцієнт.

$$A_i = f\left(D_j\right), \qquad B_j = F\left(Q_j\right).$$

Вид функції тяжіння визначається у процесі калібрування моделі й може представлятися як різні апроксимації, однією з яких є експоненціальна. Така модель дозволяє визначити обсяг переміщень між потоками маршруту як матриці кореспонденцій. Підсумковий розподіл буде тим більше і ближче до реального, чим краще вдається встановити функцію тяжіння. Загалом рух мас виду функції тяжіння може бути заданий так [5]:

$$F_{ij} = Q_i D_j G_{ij}\left(C_{ij}\right),$$

де: $G_{ij}\left(C_{ij}\right) = \exp\left(-\lambda C_{ij}\right)$.

Згідно з умовами безпеки можна записати:

$$\sum F_{ij} = Q_i, \qquad \sum F_{ij} = D_j.$$

Функція тяжіння підбирається з урахуванням розрахункових даних транспортної статистики.

Вхідними даними для моделювання є дані про переміщення вантажів транспортною мережею, таким чином визначається кількість судів між портами і дані географічного розташування портів. Для прогнозування схеми перевезення вантажів проводиться розрахунок матриць доставки між пунктами призначення, які відповідають типу судна.

Цільова функція транспортної мережі або узагальнений план роботи транспортно-логістичної системи можу бути отримані з вирішення задачі (3):

$$\sum_{a_{ij}}^{A_{ij}} \sum_{t=1}^{T} \sum_{s=1}^{S} \sum_{n=1}^{N} CQ \to min, \tag{3}$$

де C – вартість перевезення одиниці вантажу t із пункту i в пункт j, що перевозиться на судні s із використанням декількох портів n;
Q – обсяг перевезень вантажу t із пункту i до пункту j на судні s із використанням кількох портів n.

Якщо ця матриця відповідає необхідним вимогам, то на її основі можна визначити:

- скоригований розклад руху суден;
- вантажоутворювальні пункти;
- інтенсивність вантажоперевезень між різними портами;
- кількість вантажів, що перевозяться.

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-7

За такого підходу приймається, що будь-який вантаж, який треба перевезти, має точку доставки, тобто деяку цільову функцію. Багато таких вантажів утворює безліч цільових функцій, які можна описати за допомогою матриць кореспонденції. Процес утворення потоків контейнерів зумовлений потребами перевезення вантажів, тому вихідними даними завдання прогнозу потоків є розподіл портів з урахуванням географічного розташування, навіть рух судів, тобто їхня робота на маршруті за визначений час. Цілі пересування об'єднані в кілька груп (доставка вантажу до порту A, доставка вантажу до порту A_i, холостий пробіг). Рухливість морської транспортної системи можна уявити матрицею міжцільового пересування вантажів між портами (див. таблицю 1).

Таблиця 1

Матриця міжцільових переміщень вантажів між портами

	Порт 0	**Порт 1**	**Порт 2**	**Порт N**
Порт 0	0	q_{01}	q_{02}	q_{0k}
Порт 1	q_{10}	q_{11}	q_{12}	q_{1k}
Порт 2	q_{20}	q_{21}	q_{22}	q_{2k}
Порт N	q_{N0}	q_{N1}	q_{N2}	q_{Nk}

У цій матриці приймається, що пересування з порту 1 у порт N – це пересування до місця доставки вантажу. Елементи матриці повинні задовольняти умову (4):

$$\forall k \sum_l q_{kl} = \sum_l q_{lk}. \tag{4}$$

Розрахунок матриці кореспонденцій проводиться за гравітаційною моделлю. Нині для розрахунку кореспонденцій замість гравітаційних моделей використовуються ентропійні, а гравітаційна модель може бути використана тільки для завдань, у яких є дискретна структура.

Гравітаційна модель розроблена за аналогією з ньютонівським законом, який описує силу тяжіння F_{ij} між двома масами m_i і m_j, розташованими на відстані d_{ij} (5) одне від одного:

$$F_{ij} = c\frac{m_1 m_2}{d_{ij}^2}, \tag{5}$$

де c – константа.

Аналогічно закону Ньютона, транспортна гравітаційна модель описує інтенсивність потоку контейнерів T_{ij} між повною кількістю відправлень з i-ї зони (порту) Q_i (що відправляються із зони i) та прибуття в j зону D_j (що прибувають у порт j) і витрати на пересування між зонами i та j у формі C_{ij} (6, 7):

$$T_{ij} = k\frac{Q_i D_j}{C_{ij}^2}, \tag{6}$$

$$\text{де } \sum_i T_{ij} = D_j; \sum_i T_{ij} = Q_j; T_{ij} \geq 0. \tag{7}$$

Рівняння (6) означає, що сумарний потік суден із порту i до порту j має дорівнювати потоку, який прибув до порту j із числом тих, що прибули в зону, i. Сумарна кількість судів, що залишили порт, має дорівнювати сумарній кількості судів, що зайшли в порт, тобто має обов'язково дотримуватись умова (8):

$$\sum_i T_i = \sum_i D_j. \tag{8}$$

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-7

Під час моделювання вантажообіг T_{ij} між відомими векторами відправлень із портів Q_i та прибуття до портів D_j можна розрахувати за формулами (9, 10):

$$T_{ij} = A_i B_j Q_i D_j f\left(c_{ij}\right), \tag{9}$$

$$\text{де } A_i = \left[\sum_j B_j D_j \left(c_{ij}\right)\right]^{-1}; B_j = \left[A_i Q_i f\left(c_{ij}\right)\right]^{-1}, \tag{10}$$

де f(c_{ij}) – функція, яка залежить від вартості перевезення вантажів.

Функцію $f(c_{ij})$ можна використовувати як середній час пересування t_{ij}, що вважається заданим до середнього часу доставки. Середній час пересування суден між портами є більш-менш стабільним показником морської транспортної системи, дана величина може бути прогнозована.

Умови практичної реалізації

Для побудови спеціалізованого програмного забезпечення під час моделювання необхідні такі вхідні дані:

– кількість портів, до яких планується доставка вантажів визначених обсягів;
– кількість порожніх контейнерів, які доставляються до даних портів за зворотного руху;
– кількість контейнерів, які очікують навантаження в заданому порту;
– середня вартість перевезення контейнерів, або сухих вантажів;
– дані реальної геоінформаційної системи, де позначено задані порти;
– кількість суден, що перевозять вантажі;
– середній час руху судна на лінії (цей час для моделювання було взято з дискретного розкладу заходів судна в порт).

Варто врахувати, що у програму необхідно ввести можливість додаткових даних інших морських контейнерних ліній, які працюють у даних портах і можуть використовуватися під час перевезення контейнерів та інших вантажів. У розрахунку матриці кореспонденцій доставки вантажів за середній час приймаємо час, що дорівнює шляху з порту в сегменті відправлення в порт сегмента прибуття. Ця модель може бути застосована для моделювання вантажообігу між «сухими портами» та контейнерними терміналами.

Висновки

Проведене дослідження спрямоване на обґрунтування можливості застосування гравітаційної моделі й апарату розрахунку кореспонденцій для розроблення імітаційної моделі вантажообігу в морській транспортній системі України. Методика, що використовується, відкриває нові можливості для вирішення групи прогнозних завдань – як-от визначення оптимальної кількості суден, визначення найбільш завантаженого порту на лінії, кількості вантажів, що перевозяться, і часу доставки. Це досягається завдяки можливості внесення до програми схеми портів (геоінформаційних даних), кількості вантажів, що потребують перевезення між портами, кількості порожніх контейнерів і різних затримок у роботі порту. Як вихідні дані було вибрано систему розподілу руху до портів Чорноморська, Одеси та Південного, але можна також використовувати будь-яку іншу лінію.

Варто зазначити, що створений програмний засіб може бути використаний для моделювання вантажообігу між «сухими портами» і контейнерними терміналами.

У статті пропонується можливість реалізації такого підходу, як розрахунок матриць кореспонденції для визначення вантажообігу. Автори розширюють можливість застосування цього методу для реалізації різних завдань моделювання у транспортній галузі.

У результаті експериментування з додаванням нових суден на лінії, внесення динамічних даних за кількістю вантажів, що потребують перевезення, залежно від вантажопотоку, виходять числові характеристики завантаженості лінії, прогнозуються обсяги перевезень.

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-7

Список використаної літератури

1. Бакаєв О.О., Пирожков С.І., Ревенко В.Л. Міжнародні транспортні коридори – пріоритет української економічної перспективи. Соціально-економічні дослідження в перехідний період. *Україна в XXI ст.: концепції та моделі економічного розвитку :* щорічник наукових праць. 2001. Вип. 23. С. 474–491.
2. International Maritime Organization. 1974 SOLAS Convention. URL: http://www.imo.org (дата звернення: 14.02.2025).
3. International Safety Management. Code and Guidelines on Implementation of the ISM Code. London : IMO, 2012. URL: https://www.imo.org/en/ourworkhumanelement/pages/ISMCode.aspx (дата звернення: 14.02.2025).
4. Державна служба морського і внутрішнього водного транспорту та судноплавства України : офіційний сайт. URL: https://marad.gov.ua/ua/news/propoziciyu-ukrayini-shchodo-vnesennya-zmin-do-sistemi-rozpodilu-ruhu-pidhodi-do-portiv-chornomorsk-odesa-ta-pivdennij (дата звернення: 14.02.2025).
5. Ковалюк Д.О. Моделювання теплотехнологічних об’єктів із розподіленими параметрами : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2010. 182 с.

References

1. Bakaiev, O.O., Pirozhkov S.I., & Revenko V.L. (2001). Mizhnarodni transportni koridori – prioritet ukrayinskoyi ekonomichnoyi perspektivi. [International transport corridors are a priority of the Ukrainian economic perspective]. Socialno-ekonomichni doslidzhennya v perehidnij period. Ukrayina v HHI st: kontseptsii ta modeli konomichnoho rozvytku [Socio-economic research in the transition period. Ukraine in the 21st century: concepts and models of economic development]. Schorichnyk naukovyj prats’. Kyiv [in Ukrainian].
2. International Maritime Organization (2023). [Official site]. 1974 SOLAS Convention. Retrieved from http://www.imo.org [in English].
3. International Safety Management (2012). Code and Guidelines on Implementation of the ISM Code. London: IMO, 2012. Retrieved from https://www.imo.org/en/ourwork/humanelement/pages/ISMCode.aspx [in English].
4. Derzhavna sluzhba morskoho i vnutrishnoho vodnoho transportu ta sudnoplavstva Ukrainy [State Service of Maritime and Inland Water Transport and Shipping of Ukraine]. [Official site]. Retrieved from https://marad.gov.ua/ua/news/propoziciyu-ukrayini-shchodo-vnesennya-zmin-do-sistemi-rozpodilu-ruhu-pidhodi-do-portiv-chornomorsk-odesa-ta-pivdennij [in Ukrainian].
5. Kovaliuk, D.O. (2010). Modeliuvannia teplotekhnolohichnykh obiektiv z rozpodilenymy parametramy: monohrafiia [Modeling of heat engineering facilities with variable parameters]. Vinnytsia : VNTU [in Ukrainian].

Клевцов Костянтин Миколайович – д.т.н., професор, професор кафедри транспортних технологій і судноремонту Херсонської державної морської академії. E-mail: klevtsovk@i.ua, ORCID: 0000-0001-9836-3296.

Букетов Андрій Вікторович – д.т.н., професор, завідувач кафедри, професор кафедри транспортних технологій і судноремонту Херсонської державної морської академії. E-mail: buketov@tntu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9836-3296.

Шарко Олександр Володимирович – д.т.н., професор, професор кафедри транспортних технологій і судноремонту Херсонської державної морської академії. E-mail: mvsharko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8613-2837.

Сапронов Олександр Олександрович – д.т.н., професор, заступник завідувача кафедри, професор кафедри транспортних технологій і судноремонту Херсонської державної морської академії. E-mail: oo.sapronov@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1115-6556.

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-7

Васильченко Генадій Юрійович – к.пед.н., доцент, доцент кафедри транспортних технологій і судноремонту Херсонської державної морської академії. E-mail: vasilchenkogenadii@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8320-4441.

Соценко Віталій Віталійович – Ph.D., старший викладач кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії. E-mail: sotsenco.vv@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1115-6556.

Klevtsov Kostyantyn Mykolayovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Transport Technologies and Ship Repair of the Kherson State Maritime Academy. E-mail: klevtsovk@i.ua, ORCID: 0000-0001-9836-3296.

Buketov Andrii Viktorovych – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department, Professor at the Department of Transport Technologies and Ship Repair of the Kherson State Maritime Academy. E-mail: buketov@tntu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9836-3296.

Sharko Oleksandr Volodymyrovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Transport Technologies and Ship Repair of the Kherson State Maritime Academy. E-mail: mvsharko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8613-2837.

Sapronov Oleksandr Oleksandrovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of the Department, Professor at the Department of Transport Technologies and Ship Repair of the Kherson State Maritime Academy. E-mail: oo.sapronov@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1115-6556.

Vasilchenko Genadiy Yuriyovych – Doctor of Pedagogy, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Transport Technologies and Ship Repai of the Kherson State Maritime Academy. E-mail: vasilchenkogenadii@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8320-4441.

Sotsenko Vitaliy Vitaliyovych – PhD, Senior Lecturer at the Department of Transport Technologies and Mechanical Engineering, Kherson State Maritime Academy. E-mail: sotsenco.vv@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1115-6556.

https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-7