

УДК 656:51-74

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.123862

Розробка методу побудови раціонального маршруту автомобільних вантажних перевезень на основі модифікованого мурашиного алгоритму

Н. В. Халіпова, А. М. Пасічник, І. Ю. Леснікова, А. І. Кузьменко,
М. А. Кокіна, В. В. Кутирєв, Є. С. Кущенко

Запропоновано метод побудови раціонального маршруту на основі модифікації мурашиного алгоритму з введенням функції якості, що характеризує реальний стан доріг. Комплексна оцінка потенційних маршрутів враховує практичну пропускну спроможність, реальний стан ділянок маршруту та інтенсивність руху транспортних засобів. Проведено порівняння результатів розрахунків на основі класичного й модифікованого мурашиних алгоритмів

Ключові слова: раціональний маршрут, вантажні автомобільні перевезення, модифікований мурашиний алгоритм, якісний стан доріг, пропускну спроможність ділянок маршруту

1. Вступ

В сучасних умовах ефективний розвиток транспорту є запорукою стабільності та зростання економіки держави. Проте, в складних економічних умовах особливо увага загострюється на проблемах логістики як засобу оптимізації діяльності транспортно-логістичних підприємств. Впровадження логістичних принципів дозволяє ефективно здійснювати управління транспортним потенціалом підприємств.

Якість транспортного обслуговування характеризується не тільки економічністю доставки. Ефективність функціонування споживачів транспортних послуг залежить як від величини тарифу на доставку, так і від таких аспектів якості доставки, як своєчасність, схоронність та ін. На практиці при виборі варіанту доставки часто враховують лише основну частину витрат, пов'язаних з доставкою – транспортну складову [1].

Вивчення попиту на транспортні послуги показує, що найважливішою вимогою клієнтів є своєчасність доставки вантажів. Викликано це прагненням багатьох вантажовласників до скорочення запасів у виробництві та в споживанні, оскільки їхні витрати на утримання запасів по ряду галузей становлять понад 20 % на одиницю продукції, що випускається. Тому при формуванні раціональних автомобільних маршрутів перевезення вантажів необхідно враховувати цілий ряд параметрів які характеризують пропускну спроможність автомагістралей, інтенсивність руху транспорту, якісний стан мережі автошляхів, погодні умови на різних ділянках доріг, наявність сервісної інфраструктури, а також суттєво впливають на терміни та якість доставки вантажу. Тому розробка та удосконалення методології багато параметричної оптимізації побудови раціональних маршрутів магістральних автомобільних вантажних перевезень є актуальною як науковою, так і прикладною задачею.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У нинішній час логістика виступає як науковий напрям, який відіграє важливу роль у комплексній автоматизації та раціоналізації процесу перевезення вантажів і пасажирів. Головною метою логістики є раціональний вплив на управління матеріальними потоками для задоволення попиту споживачів та доставки вантажів точно в строк. Концепцією логістики є побудова інтегрованих логістичних систем, починаючи від проектування, закінчуючи утилізацією відходів і переробкою вторинної сировини.

Тому розробці проблем транспортної логістики присвячені численні праці відомих вчених. Однією із основоположних робіт, в якій систематизовані методологічні засади застосування логістичних підходів в умовах багатокритеріальності та стохастичності, є праця [1]. Актуальні питання формування інтегрованих ланцюгів поставок представлені в [2]. Класифікація моделей та методів, що застосовуються в теорії транспортної логістики при плануванні маршрутів доставки вантажів, наведено в [3]. Сучасні методи планування, організації і управління перевезеннями вантажів автомобільним транспортом розглянуто в [4]. Значна увага приділяється організації міських перевезень як вантажів, так і пасажирів. Так, у роботі [5] досліджено питання щодо організації функціонування транспортної мережі міста, розглянуто причини і механізм утворення заторів та наведені шляхи їх подолання. Особлива увага приділена питанню оптимізації руху пасажирського транспорту. Проте проблеми підвищення рівня транспортного обслуговування і виведення на вищий рівень якості транспортних послуг розглянуті недостатньо. При розгляді транспортних задач пропонується оцінювати перевезення як цілісну систему, а не проводити ранжування за критеріями [6].

Різноманітність критеріїв та обмежень при застосуванні транспортної задачі у різних практичних сферах призвело до появи великої кількості задач, які моделюють процеси розвезення вантажів. Проте науковою проблемою при транспортуванні вантажів є відсутність дієвих методик оптимізації перевезень, які б враховували обмеження пропускної спроможності доріг [7].

На даний час більшість автотранспортних підприємств використовують системи автоматизованого управління переміщенням транспортних засобів за маршрутом. Наприклад: системи GPS, «Top Route Top Logistic», Яндекс маршрути. Як зазначено у роботі [8], усі наведені програми схожі між собою, різниця лише у вартості ліцензійного продукту. Більша вартість пояснюється наявністю більшої кількості функцій. Але, незважаючи на те, що у даний час з'явилося досить велика кількість програмних комплексів класу SCM, значна частина задач управління транспортним процесом доставки вантажу залишається нерозв'язаною.

Розробці моделей та вирішенню задач оптимізації на транспортних мережах, визначенню оптимальних маршрутів присвячено праці [9–12]. Дослідження моделей логістичної система перевезень вантажів між Україною та Білоруссю, де в якості критерію ефективності доставки вантажів пропонується враховувати сумарні витрати усіх учасників логістичного процесу, приведено роботі [9]. Методика визначення схеми доставки вантажу на основі багатокритеріаль-

ної оцінки на підставі експертного оцінювання за обраними якісними та кількісними критеріями запропоновано в [10]. Математична модель для розв'язання комплексного багатокритеріального завдання визначення оборотного рейсу автомобіля, узгодження графіку роботи автотранспортних засобів та навантажувально-розвантажувальних операцій запропоновано в [11]. Розробці алгоритму проектування системи доставки вантажів в умовах сучасних тенденцій транспортного-логістичного забезпечення з мінімізацією загальних витрат приділена увага в [12]. Проте для більш ефективного використання цих результатів треба враховувати реальний стан мережі доріг.

Програмний продукт «Free way», який спрощує моделювання транспортних потоків, запропоновано до використання в роботі [13]. Досліджено динаміку швидкостей на різних групах вулиць в різні часи доби, реалізовано застосування міток, що зберігаються у базі даних. Проте, незважаючи на значну кількість наукових праць присвячених дослідженню проблем оптимізації транспортних потоків, вважати розробку даної проблематики остаточно завершеною не можна.

На сьогодні задачі маршрутизації є ключовими у сфері логістики. Існує велика кількість методів розв'язку задач дискретного типу з метою оптимізації логістичних процесів, проте вони не дають чітких рішень наявних проблем. Тому результатом пошуку оптимального рішення задачі про призначення стало використання природних поведінкових явищ, а саме: поведінки мурашиної колонії. Вирішення задачі транспортування на основі алгоритму мурашиних колоній для мультимодального перевезення та розширеної задачі комівояжера наведено відповідно в [14, 15]. В даних працях застосування класичного мурашиного алгоритму розширено шляхом введення параметричних показників та вагових коефіцієнтів. Використання гібридного симульованого мурашиного алгоритму для мінімізації загального часу роботи буксирів в порту запропоновано в [16].

Метод мурашиного алгоритму може використовуватись як для статичних моделей, так і для динамічних моделей комбінаторних задач. В будь-якому випадку буде отримане оптимальне рішення, адже збіжність у цій задачі гарантована, проте швидкість збіжності залишається невизначеною величиною і залежить від багатьох факторів.

Методи розв'язку задач, що основані на класичному мурашиному алгоритмі, є досить конкурентоздатними порівняно з іншими евристичними методами. Комбінована ефективна оптимізація на основі алгоритмів, що включають декілька локальних алгоритмів пошуку, представлена в [17]. Такий підхід, на думку авторів, забезпечує задовільну масштабованість і є конкурентоспроможним порівняно з іншими мета-евристичними алгоритмами. Пошук розв'язку задач комбінаторної оптимізації розглянуто у [18], де запропоновано нову модифікацію алгоритму мурашиних колоній адаптивного методу локального пошуку.

Область вирішення прикладних задач на основі мурашиного алгоритму є досить широкою. Застосування мурашиного алгоритму для планування багато-профільних операцій у виробничих системах наведено у [19, 20]. Багатоцільова модель програмування для оптимізації транспортної мережі імпорту сировини наф-

ти на основі використання генетичного та мурашиного алгоритмів наведена [21].

На практиці, для полегшення розрахунків пропускної спроможності доріг, змішаний транспортний потік приводять за допомогою коефіцієнтів до однорідного, як правило, до потоку легкових автомобілів. Проте такий підхід не враховує динамічний габарит автомобіля [22, 23].

Удосконалення методів на основі класичного мурашиного алгоритму, модифікація самого алгоритму дозволяє отримувати більш точні розв'язки багатокомпонентних задач в різних сферах виробничої діяльності. Але ж при розробці раціональних автомобільних маршрутів вантажних перевезень недостатньо уваги приділено врахуванню якісної характеристики доріг. Врахування стану ділянок доріг та їх пропускної спроможності необхідне при визначенні логістичного маршруту, щоб уникнути руху по ділянках з ускладненим або частково неможливим проїздом.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є формування методу побудови раціонального маршруту автомобільних вантажних перевезень між пунктами відправлення та призначення на основі модифікованого мурашиного алгоритму.

У відповідності з даною метою роботи були поставлені наступні завдання:

- обґрунтувати напрямки модифікації мурашиного алгоритму;
- сформулювати функцію якості виконання перевізного процесу на основі дослідження стану та визначення теоретичної пропускної спроможності окремих ділянок на проєктованих маршрутах;
- порівняти ефективність класичного та модифікованого алгоритмів на прикладі побудови оптимальних маршрутів від пункту відправлення до пункту призначення.

4. Формування методу побудови раціонального маршруту автомобільних вантажних перевезень

Побудова представляє ітераційний процес, що поєднує процедури синтезу при побудові та аналізі вже сформованих проектних рішень. Стан проблеми структурного аналізу в проєктуванні та логістиці наведено в [24].

Задача побудови маршрутів транспортних засобів при перевезенні вантажів відносяться до класу задач просторово-часового синтезу та є однією з найбільш складних для вирішення.

Врахування великої кількості параметрів, що характеризують систему доставки вантажів, стохастичність, невизначеність та мінливість багатьох з них викликає необхідність застосування евристичних алгоритмів.

Підходи до розв'язку задач структурного синтезу поділяють на дві групи: використання інтелектуальних методів, в основному це експертні методи; застосування методів дискретної оптимізації.

Наявність серед параметрів, що управляються, якісних змінних, викликає необхідність пошуку розв'язків у неметризуємих просторах. Це часто приводить до необхідності пошуку квазіоптимальних рішень на основі еволюційних

методів [25]. Еволюційні алгоритми використовують принципи адаптації живих організмів в умовах зовнішнього середовища в процесі еволюції.

Отримали розвиток такі групи еволюційних методів, як генетичні (Genetic Algorithms, GA); методи поведінки «натовпу» (Particles Swarm Optimization, PSO) та «колонії мурах» (Ant Colony Optimization, ACO).

Застосування еволюційного підходу передбачає:

- 1) формування множини параметрів, що управляються (X);
- 2) розробка моделі та алгоритму визначення функції мети ($F(X)$);
- 3) розробка алгоритмічної реалізації еволюційних методів.

Через наближеність та статистичну сутність даних методів основним напрямком досліджень є отримання більш ефективного алгоритму як за точністю, так і за трудомісткістю.

Відомий варіант мурашиного алгоритму (класичний), який застосовується в прикладних задачах для визначення ймовірності переходу, має такий вигляд [26].

$$\begin{cases} P_{ij,k}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\mu_{ij}(t)]^\beta}{\sum [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\mu_{ij}(t)]^\beta} \cdot 100\%, j \in J_{i,k}, \\ P_{ij,k}(t) = 0, j \notin J_{i,k}, \end{cases} \quad (1)$$

де τ_{ij} – кількість феромону на ребрі (i, j) виражає, наскільки «бажанішим» був той чи інший шлях при попередніх ітераціях та змінюється з кожною ітерацією; μ_{ij} – видимість, що являє собою величину зворотно пропорційну відстані L_{ij} між пунктами i та j ; α, β – параметри, що задають ваги сліду феромону та видимості. При $\alpha=0$ кожен раз обирається найближчий пункт, ігноруючи досвід попередників. При $\beta=0$ враховується лише досвід попередників, відстань між пунктами на маршруті повністю ігнорується.

При побудові раціональних автомобільних маршрутів вантажних перевезень важливе значення має пошук варіантів, які найбільш ефективно використовують реальний стан транспортної інфраструктури та забезпечують виконання спеціальних умов перевезень. Тому є необхідність при розробці ефективних маршрутів перевезень враховувати експлуатаційний стан ділянок доріг, їх пропускну спроможність та інтенсивність руху транспортних засобів. При цьому кожна ділянка шляху характеризується такими параметрами:

- кількість смуг руху в одну сторону;
- стан дорожнього полотна;
- структура транспортного потоку;
- відстань між пунктами маршруту.

Тому для побудови раціональних автомобільних маршрутів пропонується застосовувати модифікований метод мурашиного алгоритму за рахунок введення функції якості $\varepsilon_{ij}(t)$, яка характеризує стан доріг на кожній ділянці маршруту між пунктами та визначається так:

$$\varepsilon_{ij}(t) = \omega_{ij}(t) \cdot R_{ij}(t), \quad (2)$$

де $\omega_{ij}(t)$ – функція належності, яка характеризує стан дорожнього полотна ділянки дороги; $R_{ij}(t)$ – експертна оцінка пропускної спроможності ділянок маршруту (коефіцієнт, що характеризує пропускну спроможність ділянки дороги з ймовірністю появи транспортних засобів різнорідного типу); t – номер ітерації виконання мурашиного алгоритму.

Складність формалізації стану дорожнього полотна на окремих ділянках маршруту вимагає застосування апарату нечітких множин наближених міркувань та нечіткої логіки [1]. Складність отримання функції належності $\omega_{ij}(t)$ для оцінки стану дорожнього полотна полягає в тому, що неможливо кількісно виміряти впливові показники, тобто одержати формалізовану оцінку.

Для формалізованого опису стану дорожнього полотна було оцінено відповідними коефіцієнтами:

– $\omega_{ij}=0,5$ при незадовільному стані дороги, де наявні колії, вибоїни, ями або частково відсутнє асфальтне покриття;

– $\omega_{ij}=0,75$ при частково задовільному стані дороги, де рідко зустрічаються бугри, невеликі ями і тощо;

– $\omega_{ij}=1$ при задовільному стані ділянки дороги.

Для одержання експертної оцінки пропускної спроможності окремих ділянок маршруту $R_{ij}(t)$ пропонується:

1) визначити теоретичну пропускну спроможність кожної із ділянок доріг з урахуванням ймовірності появи на ній транспорту різнорідного типу за формулою [27]

$$P_{ij}(t) = s_{ij}(t) \cdot V_{ij}(t) \cdot q_{ij}(t), \quad (3)$$

де $s_{ij}(t)$ – коефіцієнт, що залежить від завантаженості зустрічної смуги руху на певній ділянці маршруту між пунктами i та j ($s_{ij}=1,3$ – при малому завантаженні зустрічної смуги; $s_{ij}=1$ – при рівномірному розподілі інтенсивності за смугами руху; $s_{ij}=0,99$ – при високому завантаженні зустрічної смуги руху); $V_{ij}(t)$ – середня швидкість руху на ділянці, що розглядається (км/год); $q_{ij}(t)$ – максимальна щільність руху на ділянці, що розглядається (авто/км):

$$q_{ij} = \frac{L}{l_{\text{розрах}}},$$

де L – довжина ділянки, що розглядається; $l_{\text{розрах}}$ – інтервал між автомобілями.

Для розрахунку параметру $l_{\text{розрах}}$ використано формулу [27]:

$$l_{\text{розрах}} = \rho_{\text{л}}^2 l_{\text{лл}} + \rho_{\text{л}} \rho_{\text{в}} l_{\text{лв}} + \rho_{\text{л}} \rho_{\text{а}} l_{\text{ла}} + \rho_{\text{в}} \rho_{\text{л}} l_{\text{вл}} + \rho_{\text{в}}^2 l_{\text{вв}} + \rho_{\text{в}} \rho_{\text{а}} l_{\text{ва}} + \rho_{\text{а}} \rho_{\text{л}} l_{\text{ал}} + \rho_{\text{а}} \rho_{\text{в}} l_{\text{ав}} + \rho_{\text{а}}^2 l_{\text{аа}}, \quad (4)$$

де $\rho_{\text{л}}$, $\rho_{\text{в}}$, $\rho_{\text{а}}$ – фактична ймовірність появи легкового автомобіля, вантажного автомобіля та автомобіля-тягача відповідно (визначають за статистичними даними чи задають складом руху); $l_{\text{ла}}$, $l_{\text{лв}}$, $l_{\text{ав}}$ – інтервали між різного типу автомобілями з урахуванням довжини (табл. 1, [27]).

Таблиця 1

Розрахункові інтервали $l_{\text{розрах}}$ між різними типами автомобілів

Тип наступного транспортного засобу в потоці	Тип транспортного засобу		
	легкові	вантажні	автотягачі
легкові	7,3	9,3	13,2
вантажні	9,0	9,7	14,1
автотягачі	13,0	14,2	17,3

Середню швидкість руху транспортних засобів визначається за даними про стан окремих ділянок доріг з урахуванням кількості смуг руху.

2) На основі теоретичної оцінки пропускної спроможності кожної із ділянок доріг проводиться експертна оцінка та визначаються експертні коефіцієнти R_{ij} (табл. 2).

Таблиця 2

Експертна оцінка пропускної спроможності ділянок маршруту

№ з/п	Пропускна спроможність, P_{ij} , авто/год	Експертна оцінка, R_{ij}
1	0–300	0,15
2	300–600	0,3
3	600–900	0,45
4	900–1200	0,6
5	1200–1500	0,75
6	1500 і більше	1

З урахуванням наведених міркувань для визначення ймовірності вибору маршруту пропонується наступна модифікована модель мурашиного алгоритму з введенням функції якості $\varepsilon_{ij}(t)$:

$$\begin{cases} P_{ij,k}(t) = \frac{\varepsilon_{ij}(t) [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\mu_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{l \in J_{i,k}} \varepsilon_{il}(t) [\tau_{il}(t)]^\alpha [\mu_{il}(t)]^\beta} \cdot 100\%, J \in J_{i,k}, \\ P_{ij,k}(t) = 0, j \notin J_{i,k} \end{cases} \quad (5)$$

Алгоритм реалізації запропонованої моделі за основними показниками використовує класичне ймовірнісно-пропорційне правило, проте у кожній мурахи ймовірність прямування кожною ділянкою маршруту буде різною.

Далі визначається кількість феромону яка буде відкладатися мурахою після проходження кожної ділянки маршруту. Класична формула, що визначає кількість феромону після кожної ітерації, має вигляд:

$$\Delta\tau_{ij,k}(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k(t)}, \text{ якщо } (i, j) \in T_k(t), \\ 0, \text{ якщо } (i, j) \notin T_k(t), \end{cases} \quad (6)$$

де $T_k(t)$ – маршрут, що пройдений мурахою k на ітерації t ; $L_k(t)$ – довжина цього маршруту; Q – регульований параметр, значення якого обирається одного порядку з довжиною оптимального маршруту.

Приймаємо, що оновлення феромону на маршрутах після кожної ітерації відбувається за класичною формулою [26] з урахуванням параметру випаровування феромону. Параметр випаровування феромону позначається через ρ . При цьому діапазон значень ρ знаходиться у межах $[0, 1]$.

Тоді правило оновлення феромону приймає вигляд:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t), \quad (7)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij,k}(t),$$

де m – кількість мурах у колонії.

При $\rho=0$ колонія буде враховувати усі маршрути, в тому числі ті, які є зовсім не ефективними. При такому варіанті досягти оптимального маршруту буде дуже складно.

У випадку $\rho=1$ мураха пам'ятає досвід тільки свого попередника, а досвід інших мурах повністю ігнорується. Знову ж таки існує велика ймовірність того, що мурахи будуть йти завідомо хибним шляхом.

Тоді, з врахуванням введених критеріїв, економіко-математична модель оптимізації маршруту приймає вигляд:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n L_{ij} \rightarrow \min \\ 0 \leq \omega_{ij} \leq 1; \\ 0 \leq \alpha \leq 1; \\ 0 \leq \beta \leq 1; \\ 0 \leq \rho \leq 1; \\ Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max}; \\ 0 \leq R_{ij} \leq 1. \end{cases} \quad (8)$$

На початку розрахунку кількість феромону приймається рівною невеликому додатньому числі τ_0 . Загальна кількість мурах залишається незмінною протягом виконання всього алгоритму.

Для побудови розв'язків оптимізаційної задачі (8) використовуються результати статистичного аналізу та експертні оцінки на основі доступних джерел інформації, матеріалів мережі Інтернет, тощо.

5. Результати досліджень вибору раціонального автомобільного маршруту перевезень вантажів

Для перевірки ефективності запропонованого підходу розглянемо задачу побудови раціонального маршруту перевезення вантажу між містами Одеса та Дніпро. Можливі маршрути прямування із початкового пункту у кінцевий та у зворотньому напрямку, а також довжина окремих ділянок були визначені з ви-

корисанням ресурсу Google Map. За допомогою використання режиму «Перегляд вулиць», а також аналізу інформації сайту «Автрострада. Актуальний стан доріг України» [25] була оцінена якість дорожнього полотна на визначених маршрутах, табл. 3. Ділянки дорожньої мережі обраної для побудови маршруту перевезення між містами Одеса та Дніпро наведені на рис. 1. Для проведення чисельного експерименту можливі маршрути були поділені на пункти з назвами та цифровими позначеннями: 1 – м. Дніпро; 2 – поворот на м. Знам'янку; 3 – м. Кривий Ріг; 4 – с. Дніпровські хвилі; 5 – Знам'янка; 6 – Нікополь; 7 – с. Мар'янське; 8 – м. Кропивницький; 9 – поворот на с. Возсіятське; 10 – м. Херсон; 11 – с. Возсіятське; 12 – м. Миколаїв; 13 – поворот на м. Вознесенськ; 14 – м. Вознесенськ; 15 – поворот на м. Одеса; 16 – м. Одеса. Відповідна модель графа розрахункового полігону транспортної мережі наведена на рис. 2.

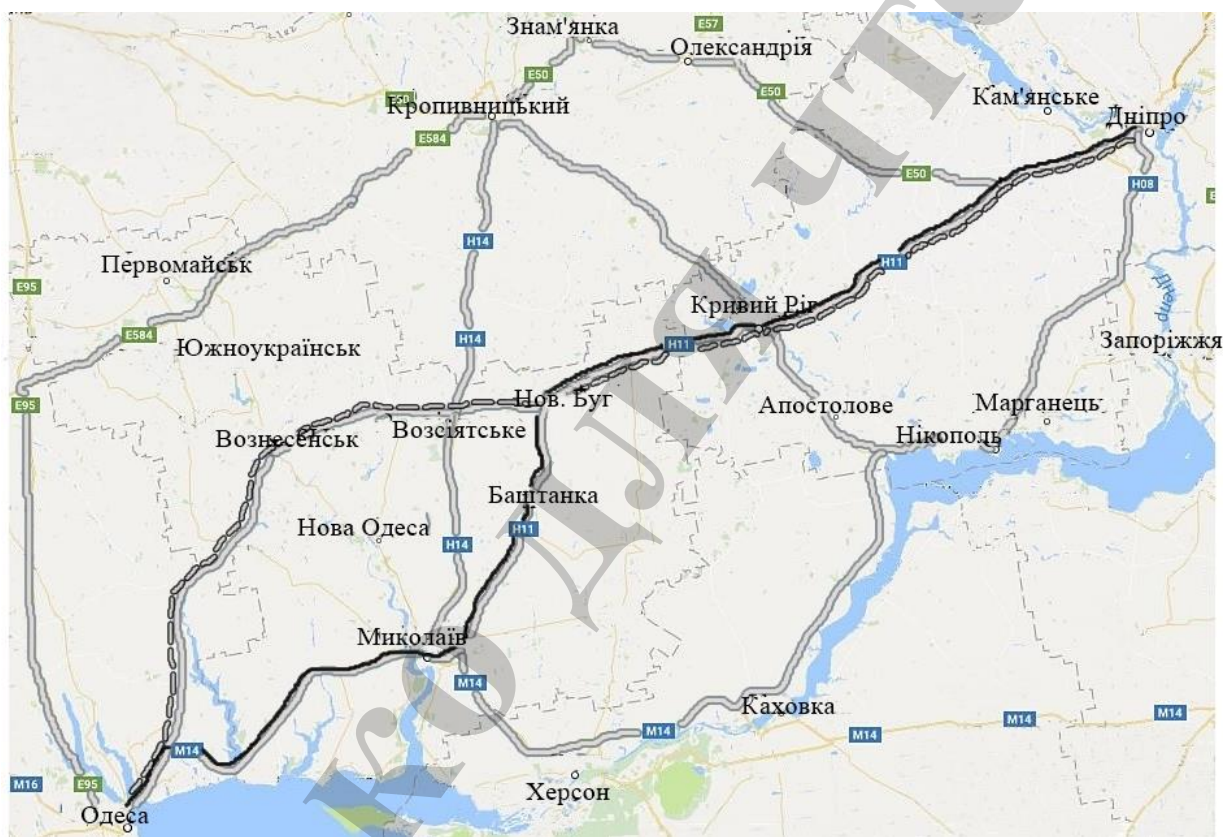


Рис. 1. Картографічне зображення маршрутів руху, де: — — мережа можливих маршрутів руху; — — маршрут руху при реалізації класичного мурашиного алгоритму; ---- — маршрут руху при застосуванні модифікованого мурашиного алгоритму

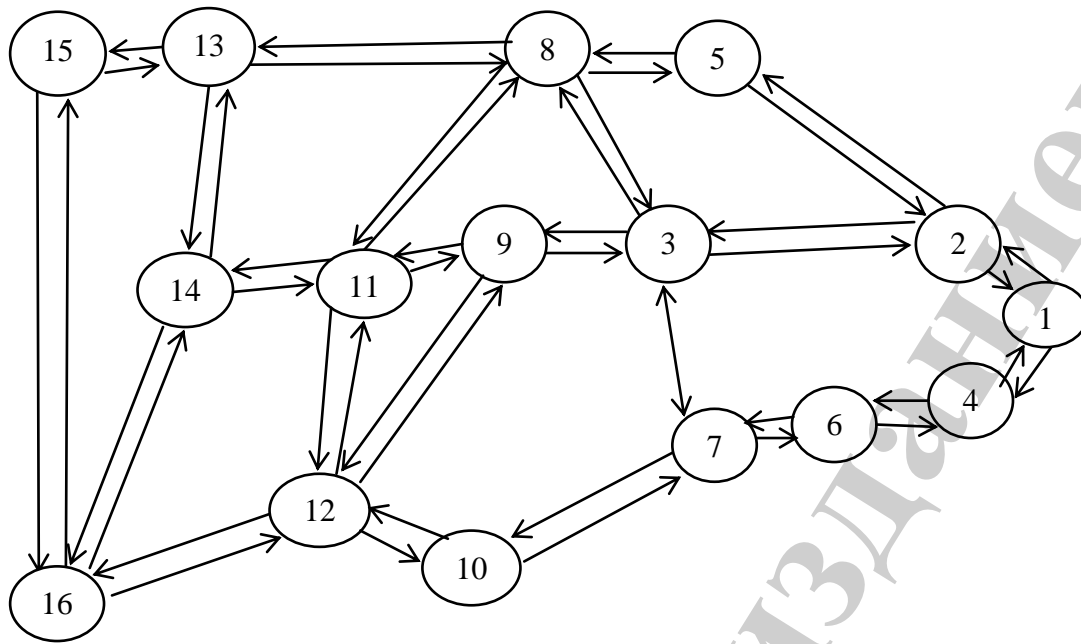


Рис. 2. Граф транспортної мережі маршрутів руху між містами Дніпро (1) і Одеса (16)

Результати розрахунків, формальний опис якості дорожнього полотна, а також остаточне значення коефіцієнту ε_{ij} наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Результати розрахунків коефіцієнту впливу на ймовірність вибору шляху прямування

№ з/п	Назва пунктів	P_{ij} , ав-то/год	Коефіцієнт R_{ij}	Стан дороги	ω_{ij}	ε_{ij}
1	Дніпро – поворот на Знам’янку (1–2)	304	0,3	Частково задовільний	0,75	0,23
2	Поворот на Знам’янку – Знам’янка (2–5)	945	0,6	Незадовільний, велика кількість ям	0,5	0,3
3	Дніпро – Дніпрові хвилі (1–4)	345	0,3	Задовільний стан	1	0,3
4	Поворот на Знам’янку – Кривий Ріг (2–3)	744	0,45	Частково задовільний, є ями	0,75	0,34
5	Дніпрові хвилі – Нікополь (4–6)	416	0,3	Незадовільний, є колії, ями	0,5	0,15
6	Знам’янка – Кропивницький (5–8)	241	0,15	Задовільний	1	0,15
7	Нікополь – Мар’янське (6–7)	252	0,15	Частково задовільний стан	0,75	0,13

8	Кривий Ріг – Поворот на Возсіятське (3–9)	308	0,3	Незадовільний стан, місцями відсутнє дорожнє полотно	0,5	0,15
9	Кропивницький – Возсіятське (8–11)	252	0,15	Незадовільний стан, є ями,	0,5	0,08
10	Кривий Ріг – Мар’янське (3–7)	443	0,3	Частково задовільний стан, є ями	0,75	0,23
11	Мар’янське – Херсон (7–10)	1125	0,6	Частково задовільний стан, є ями	0,75	0,45
12	Поворот на Возсіятське – Возсіятське (9–11)	325	0,3	Задовільний	1	0,3
13	Возсіятське – Миколаїв (11–12)	510	0,45	Незадовільний стан, є ями	0,5	0,23
14	Поворот на Возсіятське – Миколаїв (9–12)	405	0,3	Незадовільний стан, є ями	0,5	0,15
15	Херсон – Миколаїв (10–12)	502	0,3	Задовільний стан	1	0,3
16	Кропивницький – Поворот на Вознесенськ (8–13)	705	0,45	Незадовільний стан	0,5	0,23
17	Поворот на Вознесенськ – Вознесенськ (13–14)	400	0,3	Задовільний стан	1	0,3
18	Кривий Ріг – Кропивницький (3–8)	825	0,45	Частково задовільний, є ями, колії	0,75	0,34
19	Возсіятське – Вознесенськ (11–14)	364	0,3	Частково задовільний, є ями, колії	0,75	0,23
20	Вознесенськ – Одеса (14–16)	826	0,45	Частково задовільний, є ями, колії	0,75	0,34
21	Поворот на Вознесенськ (Е548) – Поворот на Одесу (13–15)	420	0,3	Незадовільний, ями, колії	0,5	0,15
22	Поворот на Одесу – Одеса (15–16)	994	0,6	Задовільний	1	0,6
23	Миколаїв – Одеса (12–16)	969	0,6	Частково задовільний	0,75	0,45

Оптимізацію маршруту на основі класичного та модифікованого алгоритмів було реалізовано в середовищі MATLAB.

Економіко-математична модель приймає наступний вигляд:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n L_{ij} \rightarrow \min;$$
$$\begin{cases} 0,5 \leq \omega_{ij} \leq 1; \\ 0,5 \leq \alpha \leq 1; \\ 0,5 \leq \beta \leq 1; \\ 0 \leq \rho \leq 1; \\ 400 \leq Q \leq 500; \\ 0,15 \leq R_{ij} \leq 1. \end{cases} \quad (9)$$

Вихідні параметри приймалися однаковими, а саме:

- кількість машин, що проїжджають за одну ітерацію – 5 одиниць;
- максимальна кількість ітерацій – 50;
- параметр Q – 450;
- $\alpha = \beta = 1$;
- початковий рівень феромону $\tau_0 = 1$;
- коефіцієнт випарування феромону $\rho = 0,3$.

Результати розрахунку оптимального маршруту на основі класичного мурашиного алгоритму наведено на рис.3. За результатами застосування класичного алгоритму було визначено, що прокладений маршрут руху проходить через пункти: 1 – 2 – 3 – 9 – 12 – 16, рис. 1. При застосуванні класичного алгоритму у зворотньому напрямку отримано такий же результат.

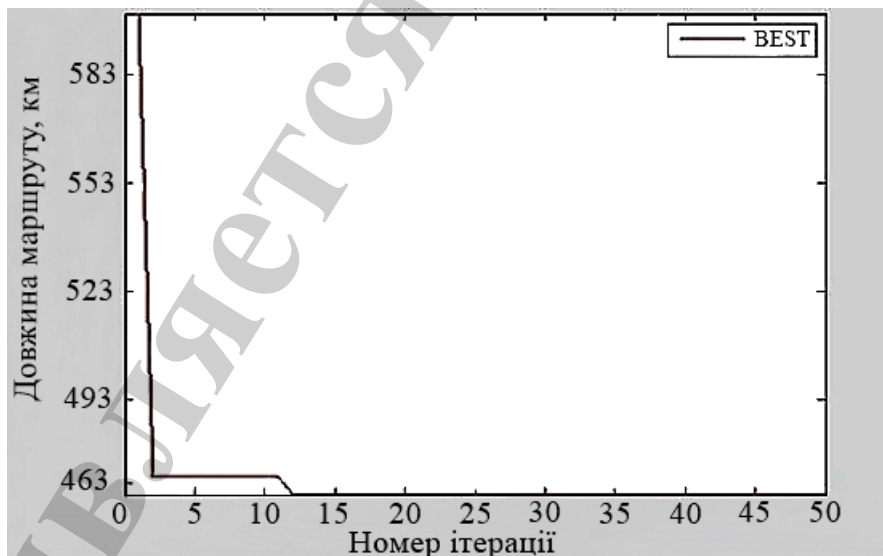


Рис. 3. Результат оптимізації маршруту на основі класичного мурашиного алгоритму

Результати розрахунку оптимального маршруту на основі модифікованого мурашиного алгоритму наведено на рис. 4. За результатами застосування модифікованого мурашиного алгоритму було визначено, що маршруту руху

проходить через пункти: 1 – 2 – 3 – 9 – 11 – 14 – 16 (рис. 1). Результат оптимізації маршруту у зворотньому напрямку при застосуванні модифікованого мурашиного алгоритму співпадає.

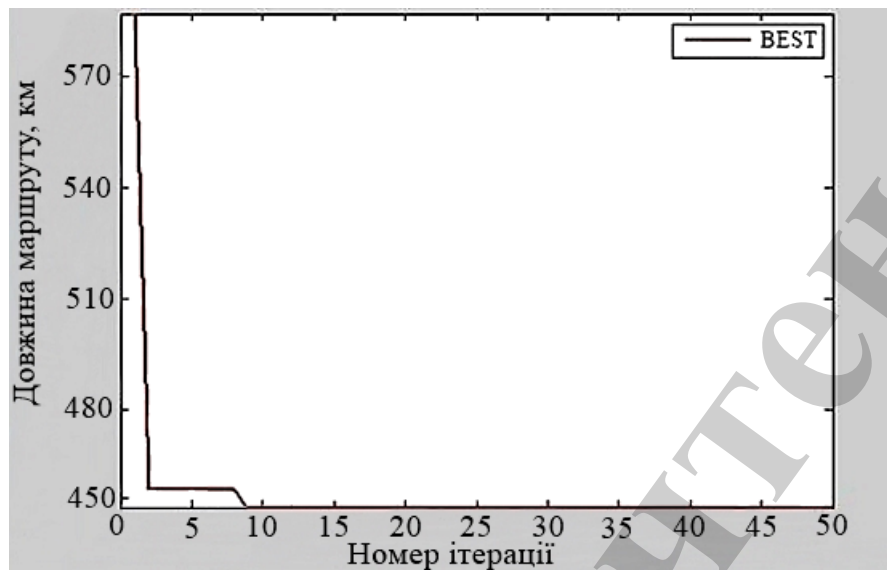


Рис. 4. Результат оптимізації маршруту на основі модифікованого мурашиного алгоритму

Порівняльний аналіз побудованих оптимальних маршрутів на основі класичного та модифікованого мурашиного алгоритмів, наведений на рис. 5, показує, що використання модифікованого алгоритму дозволяє отримати краще оптимальне рішення ($L=449,3$ км проти $461,3$ км) за меншу кількість ітерацій (9 проти 12). Отримані оптимальні розв'язки виділені маркерами без заливки.

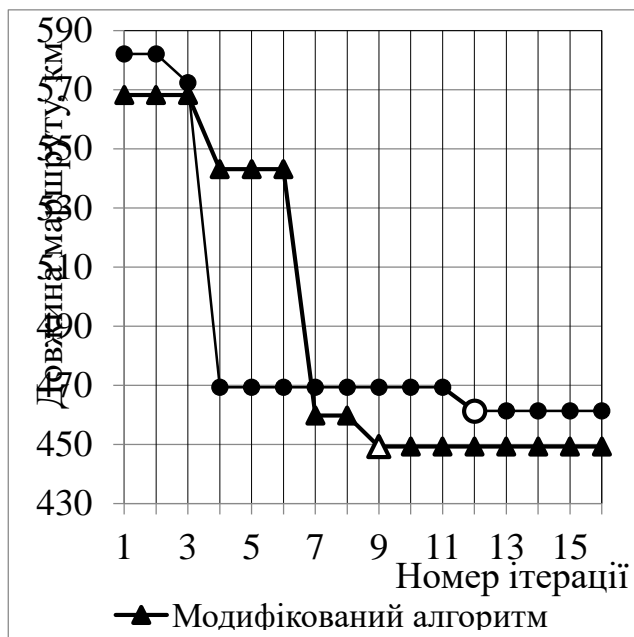


Рис. 5. Порівняння оптимізованих маршрутів на основі класичного та модифікованого мурашиного алгоритму

Проведений аналіз впливу параметрів α , β , та Q на якість отриманого рішення показав наступне.

У першому тесті параметри β та Q залишалися незмінними та досліджувався вплив параметру α на якість пошуку L (табл. 4). Незмінними в усіх розрахунках були такі параметри: кількість автомобілів за одну ітерацію, кількість ітерацій та коефіцієнт випарування феромону.

Таблиця 4
Вплив параметра α на якість пошуку довжини маршруту L

Параметр α	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
Номер ітерації	7	9	11	4	4	4	9	7
Час, с	0,16	0,11	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,13
L , км	449,3	449,3	459,8	557,65	557,8	587,8	627,5	627,5

У другому тесті було перевірено вплив параметру β на якість отриманого рішення при тих самих умовах, при цьому параметри α та Q залишалися незмінними (табл. 5).

Таблиця 5

Вплив параметра β на якість пошуку довжини маршруту L

Параметр β	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
Номер ітерації	13	6	11	10	11	10	3	8
Час, с	0,11	0,11	0,14	0,14	0,12	0,13	0,15	0,14
L , км	459,3	449,3	449,3	459,8	459,8	557,65	557,8	557,8

У третьому тесті приймали $\alpha=\beta=1$, змінювався показник Q . Результати тестування представлені у табл. 6.

Таблиця 6

Вплив параметра Q на якість пошуку довжини маршруту L

Параметр Q	400	425	450	475	500	525	550
Номер ітерації	5	11	14	6	12	11	10
Час, с	0,16	0,19	0,14	0,15	0,13	0,14	0,14
L , км	449,3	449,3	449,3	449,3	557,65	567,8	557,8

На основі аналізу отриманих показників видно, що параметр Q для даної задачі має не перевищувати значення 475.

6. Обговорення результатів дослідження розробки раціонального автомобільного маршруту вантажних перевезень на основі модифікованого мурашиного алгоритму

При визначенні ефективності використання запропонованої функції якості, що корегує ймовірність вибору напрямку руху, головною ідеєю було знайти оптимальний за відстанню маршрут, який із максимальною ймовірністю обминав би ділянки дороги з незадовільним станом дорожнього полотна.

При реалізації класичного алгоритму будувався маршрут через м. Кривий Ріг та м. Миколаїв за шляхом, який обирають переважна більшість перевізників. Проте якість дорожнього полотна на ділянках від м. Кривий Ріг до м. Миколаїв у досить поганому стані, місцями відсутнє дорожнє покриття, є колії та глибокі ями. Частково на цих ділянках ведуться ремонтні роботи.

При побудові маршруту на основі модифікованого мурашиного алгоритму, ділянка дороги від пункту 9 (поворот на с. Возсіятське) до пункту 12 (м. Миколаїв) не була включена в маршрут. Це обумовлюється тим, що серед двох варіантів було обрано подальший маршрут із більш якісним дорожнім покрит-

тям, адже $\varepsilon_{9-11}=0,3$, а $\varepsilon_{9-12}=0,15$. Отже, ймовірність вибору ділянки 9–11 в два рази більша.

Порівнюючи результати, можна зробити такі висновки:

– програмна реалізація на основі модифікованого мурашиного алгоритму продемонструвала, що з урахуванням введеного коефіцієнту ε_{ij} , маршрут будуватиметься не тільки виключно орієнтуючись на довжину ділянки маршруту від пункту до пункту, але і враховується стан дорожнього полотна та практична пропускна спроможність відповідної ділянки руху;

– отриманий на основі модифікованого мурашиного алгоритму маршрут коротший (складає 449,3 км) порівняно з отриманим на основі класичного алгоритму (461,3 км);

– маршрут на основі модифікованого мурашиного алгоритму отримано за 9 ітерацій, порівняно з отриманим розв'язком на основі класичного алгоритму за 12 ітерацій.

Порівнюючи час пошуку, маємо такі результати:

– результат на основі класичного алгоритму: обчислення у прямому напрямку – 0,10 с, у зворотному – 0,11 с;

– результат з використанням модифікованого алгоритму: у прямому напрямку – 0,11 с, у зворотному – 0,10 с.

Звичайно, у таких малих масштабах різниця є не досить суттєвою, проте при обчисленні значно більших показників різниця є помітною. Але при реалізації класичного та модифікованого мурашиних алгоритмів час пошуку рішення є співвідносним за швидкістю.

Аналіз даних табл. 4 показує, що для даної задачі, показник α краще приймати в проміжку значень від 0,5 до 1.

Аналізуючи дані табл. 5, можна говорити про те, що кращі розв'язки отримані, коли параметр β приймає значення від 0,5 до 1,5.

Аналіз результатів (табл. 6) показує, що показник Q має прийматися приблизно одного порядку з довжиною оптимального маршруту. В такому разі межі від 400 до 475 цілком задовольняють ці умови. Різниця полягає лише в тому, що чим менший показник, тим довше буде відбуватись пошук оптимального маршруту. Це обумовлено врахуванням додаткових умов здійснення перевезення наведених в оптимізаційній моделі (9).

Зазначимо також, що ефективність застосування запропонованого методу у випадку незначної кількості альтернативних варіантів маршруту перевезень зменшується.

Найбільш перспективним напрямком досліджень в даному напрямку слід вважати аналіз способу вибору параметрів для алгоритмів, що налаштовуються. Так вибір параметрів мурашиного алгоритму суттєво впливає на ефективність його застосування і тому науковцями активно розробляються різні способи адаптації параметрів евристичних алгоритмів [28].

Введення додаткових параметрів через функцію якості в модель мурашиного алгоритму забезпечує покращення його ефективності та розширення можливостей для врахування додаткових умов перевезення: рельєфу транспортних

магістралей, наявної сервісної інфраструктури, виникнення надзвичайних дорожніх ситуацій, кліматичних умов тощо.

Результати, отримані в роботі, в подальшому можуть бути використані в системах підтримки прийняття рішення для управління в процесі побудови раціональних маршрутів. Запропонований методичний підхід може бути корисним при вирішенні задачі синтезу, оскільки дозволить врахувати складні мінливі практичні умови реалізації, зокрема, в режимі реального часу.

7. Висновки

1. Запропонований в роботі метод побудови раціонального маршруту автомобільних вантажних перевезень на основі модифікованого мурашиного алгоритму дозволяє провести комплексну оцінку потенційних маршрутів транспортування з урахуванням практичної пропускної спроможності, інтенсивності руху транспорту, довжини маршруту, стану дорожнього полотна.

2. Введення функції якості виконання перевізного процесу дозволило сформувати модифіковану модель мурашиного алгоритму, яка враховує реальний стан доріг при формуванні раціональних маршрутів вантажних перевезень автомобільним транспортом. Практичне застосування запропонованого методу забезпечує комплексну оцінку потенційних маршрутів транспортування з урахуванням довжини маршруту, стану дорожнього полотна та практичної пропускної спроможності.

3. Сформовано функцію якості виконання перевізного процесу. Формалізацію стану дорожнього полотна на окремих ділянках маршруту здійснюється із застосуванням апарату нечітких множин для опису функції належності. Стан дорожнього покриття було оцінено на основі емпіричних даних та приведено до відповідних коефіцієнтів, що характеризують різний якісний стан доріг. Визначення теоретичної та практичної пропускної спроможності окремих ділянок маршруту проведено з урахуванням ймовірності появи на шляху прямування транспорту різного типу з приведенням до відповідних експертних коефіцієнтів.

4. Порівняння ефективності класичного та модифікованого мурашиного алгоритму здійснено на прикладі побудови оптимальних маршрутів від пункту відправлення до пункту призначення. Проведено аналіз сучасного стану ділянок автомобільних доріг в Україні на прикладі мережі доріг між м. Одеса та м. Дніпро. Дослідження показало, що при формуванні раціональних маршрутів вантажних перевезень автомобільним транспортом необхідно виявляти ділянки доріг, що непридатні для здійснення перевезень. Реалізація класичного та модифікованого алгоритмів довели ефективність запропонованого підходу та дозволила визначити маршрут, який оминає ділянки дороги з незадовільним станом дорожнього полотна.

Література

1. Транспортная логистика: учеб. / под ред. Л. Б. Миротина. М.: Издательство «Экзамен», 2003. 512 с.

2. Бауэрсокс Д. Дж., Клосс Д. Дж. Логистика: интегрированная цепь поставок. 2-е изд. М.: ЗАО «Олим-Бизнес», 2008. 608 с.
3. Транспортировка в логистике: учеб. пос. / Лукинский В. С., Лукинский В. В., Пластуняк И. А., Плетенева Н. Г. СПб.: СПбГИУЭ, 2005. 139 с.
4. Горев А. Э. Грузовые автомобильные перевозки. М.: ИД Академия, 2008. 288 с.
5. Леснікова І. Ю., Халіпова Н. В. Оптимізація пасажирських перевезень у вузлах мегаполісів // Системи та технології. 2015. № 2. С. 55–68
6. Аналіз теоретичних підходів до вдосконалення логістичного управління в транспортних вузлах / Нагорний Є. В., Наумов В. С., Омельченко Т. О., Літвінова Я. В. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. Т. 4, № 4 (64). С. 61–64. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/16343/13854>
7. Нагорный Е. В., Музылев Д. А., Черепаха А. С. Совершенствование технологии перевозок ТНС в городах с использованием логистических принципов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. Т. 3, № 2 (57). С. 44–46. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/3981/3648>
8. Костышева Я. В. Эффективность применения программных обеспечений в области транспортной логистики // Экономикс. 2013. № 1. С. 47–54.
9. Нагорний Є. В., Наумов В. С. Модель логістичної системи доставки вантажів між Україною та Білоруссю // Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Транспортні системи та технології перевезень. 2012. Вип. 4. С. 70–74.
10. Кічкіна О. І. Вибір оптимальної схеми доставки вантажу в логістичних системах // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2015. № 2. С. 9–11.
11. Бондарев С. І. Вдосконалення методики розрахунку часу доставки вантажів при міжнародних автоперевезеннях // Технологічний аудит та резерви виробництва. 2012. Т. 5, № 1 (7). С. 49–50. doi: 10.15587/2312-8372.2012.4809
12. Савченко Л. А. Алгоритм проектування системи доставки вантажів в умовах сучасних тенденцій транспортного забезпечення логістики // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. 2013. Вип. 2. С. 39–43.
13. Халіпова Н. В., Черненко А. О., Леснікова І. Ю. Щодо моделювання транспортних потоків для аналізу завантаженості доріг в містах // Транспортні системи та технології перевезень. Збірник наукових праць дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2016. Вип. 12. С. 90–98. doi: 10.15802/tsstt2016/85890
14. Decision of Multimodal Transportation Scheme Based on Swarm Intelligence / Lei K., Zhu X., Hou J., Huang W. // Mathematical Problems in Engineering. 2014. Vol. 2014. P. 1–10. doi: 10.1155/2014/932832
15. Ramadhani T., Hertono G. F., Handari B. D. An Ant Colony Optimization algorithm for solving the fixed destination multi-depot multiple traveling salesman problem with non-random parameters. AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1862. doi: 10.1063/1.4991227

16. Xu Q., Mao J., Jin Z. Simulated Annealing-Based Ant Colony Algorithm for Tugboat Scheduling Optimization // *Mathematical Problems in Engineering*. 2012. Vol. 2012. P. 1–22. doi: 10.1155/2012/246978
17. Ashouri M., Yousefikhoshbakht M. A Combination of Meta-heuristic and Heuristic Algorithms for the VRP, OVRP and VRP with Simultaneous Pickup and Delivery // *Brain: Broad Research in Artificial Intelligence and Neuroscience*. 2017. Vol. 8, Issue 2. P. 81–95.
18. Hassan M. R., Islam M. M., Murase K. A New Local Search Based Ant Colony Optimization Algorithm for Solving Combinatorial Optimization Problems // *IEICE Transactions on Information and Systems*. 2010. Vol. E93-D, Issue 5. P. 1127–1136. doi: 10.1587/transinf.e93.d.1127
19. Ant colony optimisation for scheduling of flexible job shop with multi-resources requirements / Kalinowski K., Krenczyk D., Paprocka I., Kempa W. M., Grabowik C. // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 112. P. 06018. doi: 10.1051/mateccconf/201711206018
20. Ant Colony Optimisation for Backward Production Scheduling / Santos L. P. dos, Vieira G. E., Leite H. V. dos R., Arns Steiner M. T. // *Advances in Artificial Intelligence*. 2012. Vol. 2012. P. 1–12. doi: 10.1155/2012/312132
21. Wang Y., Lu J. Optimization of China Crude Oil Transportation Network with Genetic Ant Colony Algorithm // *Information*. 2015. Vol. 6, Issue 4. P. 467–480. doi: 10.3390/info6030467
22. Куватов В. И. Выбор рациональных значений скорости и дистанции между автомобилями в плотном транспортном потоке // *Транспорт: наука, техника, управление*. 2012. № 11. С. 23–26.
23. Куватов В. И., Козьмовский Д. В. Оценка теоретической пропускной способности участка автомобильной дороги в условиях разнородного потока транспортных средств // *Мат-лы Междунар. научн. конф. «Современный транспорт: инфраструктура, инновации, интеллектуальные системы»*. СПб., 2012. С. 140–147.
24. Норенков И. П., Арутюнян Н. М. Эволюционные методы в задачах выбора проектных решений // *Электронный журнал «Наука и образование»*. 2007. № 9.
25. Автострада. Актуальное состояние дорог. URL: <http://autostrada.info/ua>
26. Dorigo M., Stutzle T. *Ant Colony Optimization*. Bradford Book, 2004. 319 p.
27. ОДМ 218.2.020-2012. Отраслевой дорожный методический документ. Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог. М.: Изд-во Федеральное дорожное агентство, 2012.
28. Parameter Adaptation in Ant Colony Optimization / Stützle T., López-Ibañez M., Pellegrini P., Maur M., de Oca M., Birattari M., Maur M., Dorigo M. // *Technical Report No. TR/IRIDIA/2010-002*. IRIDIA, Université Libre de Bruxelles, 2010. 26 p.