

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

УДК 656.11

ТРАНСПОРТНА МОДЕЛЬ ТА ЇЇ СТВОРЕННЯ В СЕРЕДОВИЩІ МАКРОМОДЕЛЮВАННЯ

Канд. техн. наук І. О. Хітров

TRANSPORT MODEL AND ITS DEVELOPMENT IN THE MACROMODELING ENVIRONMENT

PhD (Tech.) I. Khitrov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327165>



Анотація. У сучасних умовах розвитку інфраструктури, назрілих змін в організації транспортної діяльності та значного транспортного насичення виникає необхідність у створенні ефективних транспортних моделей для планування та управління такими системами. Транспортна модель є інструментом, за допомогою якого досліджують, аналізують і прогнозують взаємодію між різними компонентами транспортної системи з урахуванням поведінки учасників руху, обсягів перевезень і впливу непередбачуваних зовнішніх чинників. У статті розглянуто основні принципи створення транспортних моделей у середовищі макромодельювання, підходи для збору та обробки вхідних даних, а також приклади практичного застосування моделей для планування та оптимізації транспортної діяльності.

Ключові слова: транспортна система, інфраструктура, транспортна модель, модельювання, оптимізація.

Abstract. In the modern context of infrastructure development, the need for change in the organization of transport activities, and significant transport saturation, there arises a necessity to create effective transport models for planning and managing such systems. A transport model is a tool that allows the exploration, analysis, and prediction of interactions between different components of a transport system, considering the behavior of traffic participants, transportation volumes, and the impact of unforeseen external factors.

One of the most common approaches to creating such models is the use of modeling methods, which allow for the evaluation of general patterns in the functioning of a transport system at the city or regional level, identifying key problem areas, and developing strategies for their resolution.

Thanks to the possibility of virtual experimentation, transport modeling helps to avoid financial costs and risks associated with real-world changes, and answers the question «what will happen if?».

This article discusses the process of creating a transport model, highlighting the main stages of its construction, including data collection and processing, model calibration, and modeling of various development scenarios. The advantages of using models are revealed, particularly in forecasting the consequences of management decisions, implementing infrastructure projects without risks and costs, optimizing transport flows to achieve the best results, and many other areas.

Special attention is given to the practical aspects of applying software tools for modeling, which allow for the creation of detailed transport system models, analysis of various infrastructure

development scenarios, and the prediction of their changes. The use of such tools ensures calculation accuracy, simplifies the planning process, and helps to make well-grounded management decisions.

This article is relevant and useful both for the scientific community and practitioners in the field of transport planning.

Keywords: *transport system, infrastructure, transport model, modeling, optimization.*

Вступ. Транспорт діє як система засобів, технологій та організаційних структур, призначена для перевезення пасажирів, вантажів з однієї точки в іншу з метою забезпечення мобільності, економічного обміну та соціальної інтеграції [1]. Транспортна інфраструктура (сукупність об'єктів, споруд, засобів і систем) забезпечує функціонування транспорту для здійснення перевезень пасажирів і вантажів і є матеріальною основою для організації транспортного процесу [2].

Транспортна модель – це засіб, за допомогою якого вивчають, оцінюють і передбачають, як різні елементи транспортної системи взаємодіють між собою. Вона враховує особливості поведінки учасників дорожнього руху, обсяги пасажиро- та вантажопотоків, а також вплив зовнішніх умов, таких як економічні, соціальні та екологічні чинники [3].

Одним із найбільш поширених підходів для створення таких моделей є використання методів макромодельовання, за яким оцінюють загальні закономірності функціонування транспортної системи на рівні міста або регіону, визначають основні проблемні зони та розробляють стратегії для їх вирішення [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Транспортне модельовання є невід'ємною складовою сучасного планування, що дає змогу ухвалювати обґрунтовані рішення про розвиток інфраструктури, логістичне забезпечення, організації перевезень, покращення безпеки та ефективність транспортних систем і набуває все більшої популярності.

Науковці М. М. Осетрін, Д. О. Беспалов, М. І. Дорош описують основні принципи створення і роботи транспортної моделі, яка складається з інформаційних і розрахункових блоків. Інформаційні блоки зберігають дані про транспортну мережу та попит, тоді як розрахункові блоки реалізують алгоритми для аналізу та прогнозування транспортних потоків [5].

Сучасні наукові роботи зосереджені на вдосконаленні математичних моделей для аналізу транспортних потоків, наприклад пропонувано використання Марківських моделей для великомасштабного аналізу та симуляції транспортних потоків, щоб більш точно прогнозувати розподіл транспортних засобів у мережі [6].

Модельовання вантажних перевезень є критично важливим для оптимізації логістичних процесів і підвищення ефективності транспортних систем. Досліджено, що розроблення моделей з урахуванням впливу глобальних ризиків на транспортні системи сприяє підвищенню стійкості та адаптивності логістичних ланцюгів (на основі теорії графів, алгоритмів Форда-Фалкерсона та Дініца запропоновано модифікований алгоритм визначення структури транспортних перевезень) [7].

Визначення мети та завдання дослідження. Головна мета дослідження полягає у висвітленні основних принципів побудови транспортної моделі в середовищі макромодельовання. Для досягнення сформульованої мети опишемо концепцію транспортної моделі та роль макромодельовання в аналізі транспортних систем, проаналізуємо основні підходи і методи створення транспортних моделей, розглянемо програмні засоби та

інструменти для ефективного аналізу, прогнозування та оптимізації таких систем.

Основна частина дослідження.

Моделювання широко використано в науці, техніці, економіці, медицині, транспорті та багатьох інших сферах для вирішення складних завдань і вдосконалення процесів. Це процес створення моделі, використовуваної для аналізу або прогнозування поведінки реальної системи. Моделювання дає змогу проводити експерименти без ризиків і витрат, отримувати відповіді на запитання «що станеться, якщо?»; прогнозувати наслідки певних дій або змін; оптимізувати системи для досягнення найкращих результатів. Це підтверджено численними дослідженнями та практичним досвідом у галузі транспортного моделювання [4-7]. Потреба в моделюванні транспортних процесів і систем зумовлена необхідністю вдосконалення організації та оптимізації транспортної діяльності. Воно дає змогу прогнозувати, аналізувати і покращувати різні компоненти транспортних систем, що є важливим для забезпечення ефективності, безпеки та екологічної стійкості перевезень [8].

Транспортне моделювання є процесом створення і використання моделей для аналізу, прогнозування та оптимізації транспортних систем. Модель у цьому контексті є абстракцією реальної транспортної системи, яка відображує її основні характеристики, структуру і функціонування. Транспортну модель, як математичне або концептуальне відображення транспортної системи (процесу), використовують для аналізу, прогнозування та оптимізації транспортного середовища, вона відображує взаємодію між попитом на перевезення і пропозицією транспортної інфраструктури. Структура транспортної моделі охоплює відбір даних, побудову математичних або програмних моделей, розроблення алгоритмів для їх

вирішення та аналіз отриманих результатів для ухвалення обґрунтованих рішень (рис. 1).

Розглядаючи транспортне моделювання з позиції «чорної скриньки» зазначимо, що основна увага зосереджена на підході, у якому внутрішні механізми та алгоритми моделі не розглядають детально, а натомість акцент зроблено на входних даних, вихідних результатах і взаємозв'язку між ними.

У цьому випадку модель сприймають як «чорну скриньку», що перетворює певні входні параметри на вихідні результати, не потребуючи пояснення проміжних процесів. Такий підхід є корисним для швидкого аналізу та прогнозування транспортних ситуацій, не заглиблюючись у складні алгоритмічні деталі. Однак для критично важливих рішень може потребувати більш «прозорого» підходу для аналізу внутрішніх процесів моделі.

Переваги підходу «чорної скриньки» полягають у простоті використання (користувачі можуть отримати результати, не розуміючи складних внутрішніх алгоритмів), швидкому моделюванні (фокус на результатах дає змогу швидко аналізувати різні сценарії), гнучкості (можна застосовувати для різних завдань).

Недоліки підходу «чорної скриньки» проявляються в недостатній прозорості (неможливо зрозуміти, як саме модель обробляє дані, що ускладнює діагностику помилок), наявності точних даних (результати сильно залежать від якості входних даних), складності корегування (якщо модель видає неправильні результати, важко визначити причину).

Загалом метод «чорної скриньки» є потужним інструментом для спрощення складних систем і процесів, але його застосування потребує обережності та ретельного оцінювання потенційних ризиків та обмежень.



Рис. 1. Структурування транспортної моделі

Транспортна модель стає необхідною, коли для рішення потрібні системний аналіз, кількісне оцінювання, а також прогнозування змін у транспортній системі в умовах обмежених ресурсів або високої складності взаємодій. Вона широко використовується в плануванні транспортної інфраструктури або моделюванні впливу змін у транспортній мережі (розроблення нових доріг, мостів, транспортних вузлів, будівництво кільцевої дороги), урбанізації та розвитку міста з урахуванням транспортної доступності (оцінювання впливу нових житлових, комерційних або промислових зон на транспортну систему), прогнозуванні транспортного попиту (аналіз змін у попиті на транспортні послуги через зростання населення або економічний розвиток або оцінювання завантаженості доріг), організації дорожнього руху (оптимізація схем дорожнього руху, розроблення заходів для зменшення заторів і підвищення безпеки), екологічного моніторингу (зниження викидів шкідливих речовин від транспорту, оцінювання впливу нових проєктів на екологію та якість повітря), економічної ефективності (аналіз економічної доцільності транспортних проєктів, оптимізації транспортних витрат для вантажних перевезень), плануванні дій у надзвичайних ситуаціях (розроблення моделей евакуації населення у випадках надзвичайних ситуацій, моделювання впливу аварій або реконструкцій на потоки транспорту), впровадженні інновацій (тестування впливу нових видів транспорту, аналіз ефективності нових технологій), розвитку громадського транспорту (розроблення нових маршрутів, графіків або змін у тарифній системі), реалізації соціальних потреб (забезпечення транспортної доступності для віддалених або малонаселених районів, аналіз впливу транспорту на якість життя і мобільність населення) тощо (рис. 2).

Робота з транспортною моделлю – це ітеративний процес, що включає

систематичний збір даних, моделювання, аналіз і вдосконалення рішень для транспортної системи, де кожен етап важливий для точності результатів і ефективності ухвалених рішень (рис. 3). Використання сучасних програмних засобів допомагає реалізувати ці етапи, створюючи точні та надійні моделі транспортних систем.

Саме чітка послідовність дій у роботі з транспортною моделлю забезпечує системний підхід для аналізу та вирішення транспортних проблем шляхом визначення цілей і завдань (чітке формулювання проблеми або потреби в її використанні), збору, обробки та верифікації даних (соціально-економічних, транспортних, поведінкових тощо), створення транспортної мережі, моделювання попиту на транспорт, наступного калібрування з валідацією моделі, аналізу сценаріїв і прогнозування, розробленням рекомендацій.

Правильна послідовність дій допомагає побудувати модель, яка буде адаптована до змін, наприклад змін транспортного потоку або нових технологій. Якщо модель спочатку розроблена за чітким планом, її буде простіше оновлювати, що забезпечить її актуальність у майбутньому. Точні прогнози та моделювання різних сценаріїв розвитку можуть бути здійснені лише після того, як усі попередні етапи правильно завершені. Це дасть змогу оцінити наслідки змін без ризиків і фінансових витрат.

Необхідною умовою для створення надійної транспортної моделі є взаємопов'язані та обов'язкові умови верифікації (внутрішня коректність моделі та програмної реалізації), калібрування (налаштування параметрів для досягнення точних результатів) і валідації (зовнішня відповідність результатів моделі реальним умовам) (табл. 1).

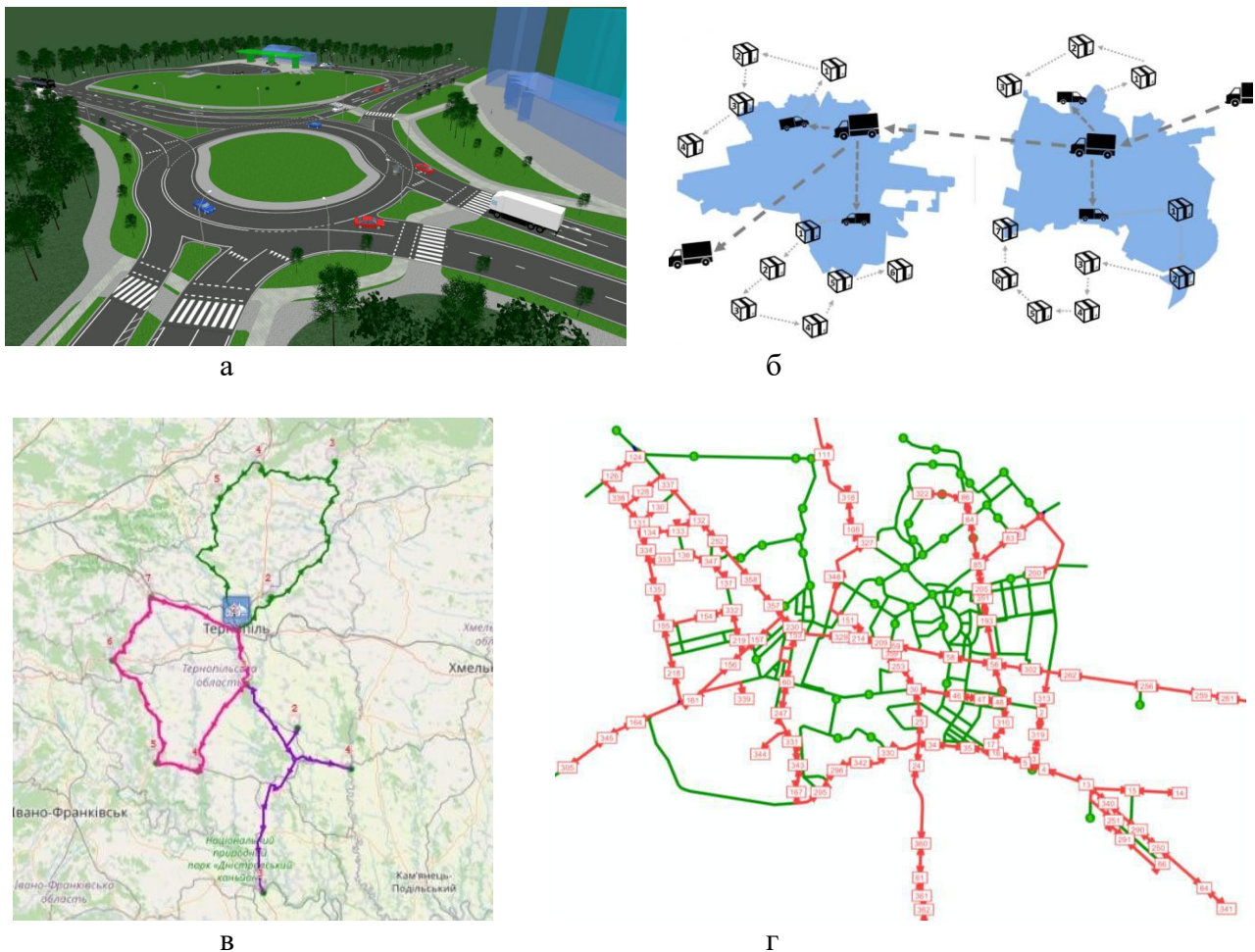


Рис. 2. Окремі приклади (елементи) реалізації транспортного моделювання:
 а – перехрестя з круговим рухом; б – логістичне забезпечення регіону;
 в – маршрутизація вантажних перевезень; г – організація міської пасажирської маршрутної системи

Верифікація моделі передбачає перевірку коректності внутрішньої структури моделі, її алгоритмів і програмного коду, щоб переконатися, що модель правильно реалізована і виконує математичні або логічні розрахунки згідно з поставленими вимогами.

Головна суть калібрування транспортної моделі полягає в налаштуванні параметрів моделі так, щоб її результати максимально точно відповідали реальним умовам транспортної системи.

Калібрування є необхідним етапом, оскільки навіть найскладніші моделі працюють на основі припущень і спрощень, які можуть не повністю відображувати дійсність. Наприклад, якщо модель прогнозує, що на певній ділянці дороги щоденно проїжджає 10 тисяч автомобілів, а реальні дані показують 12 тисяч, то через калібрування модель буде налаштована так, щоб урахувати додаткові чинники (наприклад вищий попит або більшу пропускну спроможність).



Рис. 3. Поетапність роботи з транспортною моделлю міста [3]

Таблиця 1

Відмінності між верифікацією, калібруванням і валідацією транспортної моделі

Критерій	Верифікація	Калібрування	Валідація
1	2	3	4
Основна мета	Перевірка правильності реалізації моделі (алгоритми, код)	Налаштування параметрів моделі для зменшення відхилень від реальних даних	Перевірка відповідності результатів моделі реальним даним
Основне питання	«Чи правильно побудована модель?»	«Як налаштувати модель для більшої точності?»	«Чи правильно модель відображує реальність?»
Що перевіряють	Логіка, математичні залежності, програмний код	Параметри моделі та їхній вплив на результати	Точність прогнозів і результатів моделі

Продовження табл. 1

1	2	3	4
Методи перевірки	Тестування, аналіз коду, перевірка алгоритмів	Підбір і налаштування параметрів на основі реальних даних	Порівняння результатів моделювання з фактичними даними
Інструменти	Контрольні тести, аналітичні обчислення, огляд коду	Статистичні методи, оптимізація параметрів	Статистичні метрики (середньоквадратична, абсолютна помилка, кореляція тощо)
Етап роботи	На початкових етапах розроблення моделі	Після верифікації, перед валідацією	На завершальному етапі моделювання
Результат	Коректно реалізована модель	Параметри моделі налаштовані для точних результатів	Модель підтверджена як надійна та реалістична

Порівнюють дані (валідація) транспортної моделі з метою перевірки точності, надійності та адекватності моделі для опису реальної транспортної системи. Під час валідації модель порівнюють із реальними даними, щоб оцінити, наскільки її результати відповідають дійсності, а сама вона гарантує обґрунтованість і надійність ухвалених рішень на її основі; виявляють її слабкі місця перед використанням, що підвищує довіру до моделювання серед замовників, фахівців і громадськості. Валідація є завершальним етапом побудови транспортної моделі, який підтверджує, що

модель достовірно відображує реальну транспортну систему і придатна для аналізу та прогнозування.

Для транспортного моделювання пропонувано сучасні інструменти у вигляді програмних комплексів, що дають змогу аналізувати і прогнозувати транспортні потоки, поведінку користувачів транспорту і ефективність транспортної інфраструктури. Ці інструменти допомагають у вирішенні завдань транспортного планування, оптимізації руху та оцінювання впливу інфраструктурних рішень (табл. 2).

Таблиця 2

Популярні інструменти сучасного транспортного моделювання [9, 10]

Назва програмного забезпечення	Рівень моделювання	Призначення	Особливості
PTV VISUM	макроскопічний	стратегічне планування, моделювання громадського транспорту	дає змогу будувати транспортні моделі великих міст і регіонів
PTV VISSIM	мікроскопічний	моделювання руху на перехрестях, пішохідних потоків та поведінки окремих транспортних засобів	деталізоване моделювання світлофорів, заторів, динамічного руху

Продовження табл. 2

1	2	3	4
Aimsun Next	макро-, мезо- та мікроскопічний	моделювання міських та міжміських транспортних систем	гібридне моделювання з високою гнучкістю і деталізацією
SUMO	мікроскопічний	моделювання міських транспортних потоків у реальному часі	безкоштовний інструмент із відкритим кодом
CUBE	макроскопічний	прогнозування попиту на транспортні послуги та стратегічне планування	аналізує транспортні мережі та взаємодію між регіонами
MATSim	агентиорієнтований	моделювання поведінки користувачів транспорту (поїздки, вибір маршруту)	гнучка платформа для великих транспортних досліджень
TransCAD	макроскопічний	просторовий аналіз та моделювання транспортних потоків	інтегрована ГІС-система для роботи з транспортними даними

Перевагою сучасних інструментів транспортного моделювання є їхня висока деталізація (можливість аналізувати потоки на рівні окремих транспортних засобів або пасажирів), гнучкість (можливість створення різних сценаріїв для аналізу змін у транспортній мережі), візуалізація (наочне відображення результатів моделювання у вигляді графіків, карт, анімації), інтеграція з іншими системами (можливість використовувати ГІС-дані та інші інструменти), висока ефективність планування (допомагають оцінити ефективність інфраструктурних проєктів до їх реалізації).

Однією з головних переваг програмного моделювання є можливість віртуального тестування різних сценаріїв без реальних витрат і ризиків. Наприклад, можна протестувати нові маршрути, зміни в інфраструктурі або правилах руху, щоб оцінити їхній вплив на транспортні потоки, без необхідності впроваджувати зміни в реальній системі; знизити ймовірність людських помилок з плануванням транспортної мережі та забезпечити більш

системний підхід для управління транспортом.

Висновки. Створення транспортної моделі в середовищі макромоделювання є сучасним інструментом, що дає змогу ефективно аналізувати транспортні потоки, планувати розвиток транспортної інфраструктури та прогнозувати наслідки різних сценаріїв управління мережами. Завдяки можливості віртуального експериментування транспортне моделювання дає змогу уникнути фінансових витрат і ризиків, пов'язаних із реальними змінами, і відповісти на запитання «що станеться, якщо?».

Отже, розроблення та впровадження транспортних моделей у середовищі макромоделювання є важливим інструментом для сталого розвитку урбанізованих територій. Подальше вдосконалення методів та інтеграція з інноваційними технологіями у вигляді програмних засобів відкривають нові можливості для підвищення ефективності та точності прогнозування в транспортному плануванні.

Список використаних джерел

1. The 6 Types of Transportation in Logistics. *Inboundlogistics*: веб-сайт. URL: <https://www.inboundlogistics.com/articles/transportation-in-logistics/>.
2. The Importance of Designing Effective Urban Transportation Infrastructure. *Acb Consulting Services*: веб-сайт. URL: <https://www.acbconsultingservices.com/construction-management-for-transportation/what-is-transport-infrastructure-and-what-types-of-transport-infrastructure-should-we-plan/>.
3. Транспортні моделі міст. *Про мобільність*: веб-сайт. URL: <https://pro-mobility.org/transportni-modeli-mist/>.
4. Joni Arliansyah, Muhammad Rizky Prasetyo, Astri Yuli Kurnia. Planning of City Transportation Infrastructure Based on Macro Simulation Model. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*. 2017. 7(4):1262. URL: https://www.researchgate.net/publication/319403908_Planning_of_City_Transportation_Infrastructure_Based_on_Macro_Simulation_Model.
5. Осетрін М. М., Беспалов Д. О., Дорош М. І. Основні принципи створення транспортної моделі міста. *Містобудування та територіальне планування*. Київ: КНУБА, 2015. Вип. 57. С. 309–320. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/bitstreams/966e763f-8870-4407-bc49-0ef9ab627c6c/download>.
6. Renátó Besenczi, Norbert Bátfai, Péter Jeszenszky, Roland Major, Fanny Monori, Márton Ispány. Large-scale Analysis and Simulation of Traffic Flow using Markov Models. *PLoS ONE*. 2021. 16(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246062>.
7. Моделювання транспортно-логістичних схем вантажних перевезень в умовах глобальних ризиків / О. В. Шарко, А. В. Букетов, К. М. Клевцов та ін. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. 3 (100). С. 94–105. [http://dx.doi.org/10.18372/0370-2197.3\(100\).17899](http://dx.doi.org/10.18372/0370-2197.3(100).17899).
8. Хітров І. О. Ключові аспекти моделювання транспортних процесів і систем. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту: збірник тез XVII Міжнар. наук.-практ. конфер., 21-23 жовтня 2024 року*. Житомир: Житомирська політехніка, 2024. С. 237–238. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/12/237.pdf>.
9. Hantong Wang, Ziyi Shi, Yong Chen, Zheng Zhu, Xiqun Chen. Transportation Simulation Modeling and Location-Based Services Data Completion Based on a Data and Model Dual-Driven Approach. *Applied Sciences*. 2024. 14. 4366. <https://doi.org/10.3390/app14114366>.
10. Любий Є. В., Пономарьова Н. В., Чернишова О. С. Транспортне планування міст: сучасні інструменти транспортного моделювання автотранспортних систем. *Комунальне господарство міст*. 2016. Вип. 128. С. 76–82. URL: <https://eprints.kname.edu.ua/43470/1/4776-9493-1-SM.pdf>.

Хітров Ігор Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій і технічного сервісу, Національний університет водного господарства та природокористування. ORCID iD: 0000-0003-2310-1472. Тел.: +38 (099) 295-97-70. E-mail: i.o.khitrov@nuwm.edu.ua.

Ihor Khitrov, PhD (Tech). Associate Professor, department of the Transport Technology and Technical Service, National University of Water and Environmental Engineering. ORCID iD: 0000-0003-2310-1472. Tel.: +38 (099) 295-97-70. E-mail: i.o.khitrov@nuwm.edu.ua.

Статтю прийнято 05.02. 2025 р.