

А. А. КОЧИНА

кандидат технічних наук,
доцент кафедри транспортних систем і логістики
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
ORCID: 0000-0001-8377-4770

І. С. НАГЛЮК

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри організації та безпеки дорожнього руху
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
ORCID: 0000-0001-9411-4479

Л. С. АБРАМОВА

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри організації та безпеки дорожнього руху
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
ORCID: 0000-0003-1182-9618

С. А. САХНО

здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти
кафедри транспортних систем і логістики
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
ORCID: 0009-0002-7874-3376

МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ МОДЕЛІ ТРАНСПОРТНОГО ПОПИТУ НА ПЕРЕСУВАННЯ ПАСАЖИРІВУ ПРИМІСЬКОМУ СПОЛУЧЕННІ НА ОСНОВІ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ РОЗПОДІЛУ ВІДСТАНЕЙ ПОЇЗДОК

Мета дослідження полягає у формалізації методики формування матриць пасажирських кореспонденцій у приміському сполученні у межах інтервальної концепції моделювання транспортного попиту на пересування пасажирів громадським транспортом з урахуванням статистичних закономірностей розподілу відстаней поїздок.

Наукова новизна полягає у розробленні підходу до формування матриць пасажирських кореспонденцій, який передбачає використання ймовірнісних інтервалів дальності пересувань, розрахунок частки пасажирів у межах кожного інтервалу та формування системи обмежень для розподілу кореспонденцій між транспортними районами з урахуванням емпіричного розподілу відстаней поїздок.

Результати дослідження включають розроблення алгоритму генерації матриць пасажирських кореспонденцій, які задовольняють обмеженням щодо місткостей транспортних районів та відтворюють фактичний розподіл дальності пересувань. Алгоритм генерації матриць пасажирських кореспонденцій реалізовано у програмному середовищі MS Excel із застосуванням генератора випадкових чисел і процедур перевірки відповідності отриманих матриць кореспонденцій емпіричним частотам розподілу відстаней поїздок. Запропонована методика забезпечує звуження множини можливих станів матриць до тих, що узгоджуються з реальними просторово-часовими характеристиками транспортного попиту.

Висновки полягають у тому, що запропонований підхід підвищує обґрунтованість формування матриць пасажирських кореспонденцій у приміському сполученні, забезпечує більш достовірне відтворення фактичних закономірностей переміщень населення та створює надійну основу для прогнозування транспортного попиту й оцінювання сценаріїв розвитку прилеглих до міських територій.

Ключові слова: громадський транспорт, матриця пасажирських кореспонденцій, моделювання транспортного попиту, пасажиропотоки, приміське сполучення, розподіл відстаней поїздок.

А. А. KOCHINA

PhD in Transport Systems,
Associate Professor at the Department of Transport Systems and Logistics
Kharkiv National Automobile and Highway University
ORCID: 0000-0001-8377-4770



I. S. NAHLIUK

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Road Traffic Management and Safety
Kharkiv National Automobile and Highway University
ORCID: 0000-0001-9411-4479

L. S. ABRAMOVA

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Road Traffic Management and Safety
Kharkiv National Automobile and Highway University
ORCID: 0000-0003-1182-9618

S. A. SAKHNO

Postgraduate Student at the Department of Transport Systems and Logistics
Kharkiv National Automobile and Highway University
ORCID: 0009-0002-7874-3376

METHODOLOGY FOR FORMING A TRANSPORT DEMAND MODEL FOR PASSENGER MOBILITY IN SUBURBAN TRANSPORT BASED ON TRIP DISTANCE DISTRIBUTION PATTERNS

The purpose of the study is to formalize a methodology for constructing passenger origin–destination matrices in suburban transport within the framework of the interval concept of public transport demand modeling, taking into account statistical patterns in trip distance distribution.

Scientific novelty lies in the development of an approach to forming passenger origin–destination matrices that involves the use of probabilistic intervals of travel distance, calculation of the share of passengers within each interval, and the formation of a system of constraints for allocating correspondences between transport zones based on the empirical distribution of trip distances.

Research results include the development of an algorithm for generating passenger origin–destination matrices that satisfy constraints on transport zone capacities and reproduce the actual distribution of travel distances. The algorithm is implemented in the MS Excel software environment using a random number generator and procedures for verifying the compliance of generated correspondence matrices with empirical frequencies of trip distance distribution. The proposed methodology ensures a reduction in the set of possible matrix states to those consistent with real spatial and temporal characteristics of transport demand.

Conclusions indicate that the proposed approach improves the validity of forming passenger origin–destination matrices in suburban transport, ensures more accurate reproduction of actual mobility patterns of the population, and provides a reliable basis for forecasting transport demand and evaluating development scenarios for areas adjacent to urban territories.

Key words: public transport, passenger origin–destination matrix, transport demand modeling, passenger flows, suburban transport, trip distance distribution.

Постановка проблеми

Формування моделей транспортного попиту на пересування пасажирів громадським транспортом (ГТ) є дуже складною задачею у межах розробки прогностичних транспортних моделей. До цього слід також додати відсутність надійних методик розробки матриць пасажирських кореспонденцій (МПК), які є відображенням транспортного попиту, на прикладі приміського сполучення. На відміну від методів, що використовуються для побудови загальноміських МПК, для приміського сполучення, ця задача зводиться до отримання середньозваженої МПК, яка, у більшості випадків, використовується для оцінювання рівня якості транспортного обслуговування пасажирів у приміському сполученні ГТ [1–3].

Застосування закономірностей розподілу дальності пересувань у приміському сполученні в межах інтервальної концепції (ІК) моделювання транспортного попиту може стати надійною основою для удосконалення методів визначення потреб у пасажирських перевезеннях ГТ. Такий підхід забезпечує можливість безпосереднього врахування параметрів встановлених закономірностей відстаней поїздок під час розподілу кореспонденцій між клітинками МПК, що дозволяє формувати матриці, які узгоджуються з фактичними просторово-часовими характеристиками переміщень [1–4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Формування попиту на пасажирські перевезення є складним багатофакторним процесом, що залежить від соціально-економічних, просторових, інфраструктурних і поведінкових характеристик населення. Особливої актуальності ця проблема набуває у сфері міського та приміського сполучення, де інтенсивність переміщень формується під впливом процесів розселення, територіальної організації міста та рівня розвитку транспортної системи [1, 2]. До того ж, на величину транспортного попиту впливає безліч факторів як внутрішнього, так і зовнішнього

характеру. Якщо розглядати особливості приміського сполучення, то серед основних показників, які впливають на попит, можна виділити [2]: рухомість населення; систему розселення населення; рівень розвитку транспортної інфраструктури та рівень автомобілізації.

Слід розуміти, що найбільшого розвитку отримали методи формування МПК на прикладі міських територій, тому аналітичний огляд методів слід зосередити саме на прикладі таких об'єктів і розглянути можливість їх ефективною інтеграції для приміського сполучення.

У дисертаційній роботі [4] запропоновано підхід до визначення потреб у перевезеннях ГТ, що базується на використанні функції розселення міського населення, де встановлено, що просторовий розподіл пасажироутворюючих пунктів та відстаней поїздок має статистично закономірний характер і може бути описаний гама-розподілом. Результати даного дослідження можуть бути взяті за основу при формуванні методологічної основи для подальшого аналізу дальності поїздок у міському та приміському сполученні.

Нормативно-методичні підходи до визначення існуючої та прогнозованої інтенсивності руху викладені у [5]. Документ передбачає використання статистичних методів обробки транспортних потоків, екстраполяції тенденцій та коефіцієнтів росту для прогнозування майбутніх обсягів руху. Запропоновані у [5] методи дозволяють отримувати практичні оцінки інтенсивності руху, однак вони мають обмеження щодо врахування просторової структури попиту та поведінкових чинників мобільності населення.

Економічні аспекти транспортного попиту розглядаються у [6]. У межах цього підходу транспортний попит розглядається як фактор, що впливає на ефективність інфраструктурних інвестицій, економію часу перевезень та зменшення експлуатаційних витрат. Методика забезпечує інструментарій для оцінки доцільності дорожніх проєктів, проте основний акцент зроблено на економічних показниках, а не на закономірностях формування пасажирських потоків.

Фундаментальні засади транспортного моделювання викладені у праці [7], де систематизовано класичні підходи до моделювання транспортного попиту, зокрема чотирьохетапну модель. Значну увагу приділено поведінковим моделям вибору, включаючи логіт-моделі, які дозволяють враховувати індивідуальні переваги користувачів транспортної системи. Запропоновані у [7] методи є базовими для формування сучасних регіональних і міських транспортних моделей.

Поведінкові та соціально-економічні аспекти мобільності населення розглянуті у роботі [8], де досліджується взаємозв'язок між доходами населення, розподілом часу поїздок та мотивацією транспортного вибору. Автори доводять, що транспортний попит формується не лише інфраструктурними можливостями, але й економічними обмеженнями, що визначають прийняття рішень щодо пересування. Отримані в [8] результати підкреслюють необхідність інтеграції економічних і поведінкових факторів у моделі транспортного попиту.

Практична реалізація регіонального транспортного моделювання представлена у звіті [9]. Тут здійснено розробку та валідацію регіональної транспортної моделі з урахуванням землекористування, соціально-економічних параметрів та структури транспортної мережі. Отримані результати демонструють ефективність інтегрованого підходу до прогнозування транспортних потоків та підтверджують важливість узгодження транспортного попиту з просторовим розвитком територій.

У дослідженні [10] розглянуто обмеження мобільності домогосподарств у контексті взаємодії землекористування та транспорту. Автором показано, що вибір місця проживання та транспортні переміщення залежать від часових і фінансових бюджетів населення, що формує довгострокові закономірності попиту на перевезення. Такий підхід дозволяє враховувати не лише поточні транспортні потреби, але й перспективні зміни в структурі розселення.

Сучасні підходи до формування транспортного попиту поєднують просторове моделювання, економічні чинники, поведінкові теорії та статистичні закономірності розподілу дальності поїздок. Водночас залишається актуальним завдання адаптації існуючих моделей до умов приміського сполучення, з урахуванням специфіки розселення населення, транспортної інфраструктури та стохастичного характеру пересувань.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є формалізація методики формування МПК при пересуванні населення ГТ у приміському сполученні з урахуванням встановлених закономірностей розподілу відстаней поїздок.

Викладення основного матеріалу дослідження

У загальному випадку закономірності розподілу фактичних відстаней пересування користувачів ГТ можна розглядати як відображення реалізованого транспортного попиту. Враховуючи те, що в українських містах у приміському сполученні використовується переважно залізничний та автомобільний транспорт, відповідний транспортний попит реалізується на транспортних мережах (ТМ) ГТ цих видів сполучення. При цьому для міст, у яких існує залізничне сполучення, необхідно враховувати частку переміщень, які реалізуються на цьому виді транспорту, але й для найкрупніших, і для малих міст автомобільний транспорт є основним постачальником транспортних послуг у приміському сполученні. Вивчення характеристик ТМ ГТ для автомобільного транспорту у [11] підтвердило, що ТМ ГТ є інструментом, придатним для дослідження просторового розподілу переміщень у приміському сполученні, де було виявлено можливість опису емпіричного розподілу відстаней переміщень показниковим законом розподілу.

Це вказує на можливість визначення найбільш ймовірних станів МПК, посилаючись на криву щільності показникового розподілу, якою описуються закономірності формування пасажиропотоків на території, що оточує місто залежно від віддаленості від нього. У даному випадку найбільш доцільно застосувати ІК моделювання потреб у транспортних послугах. Для розрахунку шуканих матриць потрібно використовувати фактичні закономірності розподілу відстаней поїздок у приміському сполученні.

Наявність параметрів розподілу відстаней поїздок населення дозволить визначити шукані МПК, які приведуть до отримання зазначеного або максимально наближеного фактичного розподілу відстаней пересувань. Відшукання таких станів МПК повинне базуватись на встановленні значень кореспонденцій, що будуть реалізовуватись на визначену відстань з матриці відстаней між транспортними районами (ТР) і в загальній сукупності породять фактичний розподіл відстаней поїздок пасажирів у приміському сполученні.

На основі цього можна встановити порядок заповнення МПК. Фактичний розподіл відстаней поїздок дозволить визначити відсоткове співвідношення кількості мешканців, дальності пересувань яких відносяться до встановлених інтервалів відстаней пересувань у приміському сполученні. Визначити кількість інтервалів, за якими будуть групуватися відстані пересувань, можна безпосередньо за оцінки узгодження емпіричного розподілу цих відстаней з теоретичним показниковим розподілом. Також емпіричний розподіл цих відстаней дає можливість визначення ширини інтервалів.

Згідно з результатами, представленими у [11], був отриманий розподіл відстані пересування пасажирів l'_p , який дозволяє визначити відсоткове співвідношення кількості мешканців, дальності пересувань яких до міста буде відноситись до встановлених інтервалів відстаней пересувань

$$l'_{ij}^{(\Delta_I)} = l_{ij} \in [l_p^{(\Delta_I)}] = l_p^{(\Delta_I)} \in (\Delta_I^H; \Delta_I^E), \quad (1)$$

де l_{ij} – відстань пересувань за межами міста між i -м та j -м ТР, км; $l_p^{(\Delta_I)}$ – відстань поїздок у напрямку міста в інтервалі групування згідно фактичного розподілу відстаней пересувань пасажирів, км; $\Delta_I = (\Delta_I^H; \Delta_I^E)$ – інтервал групування відстаней пересувань пасажирів, $I = 1, 2, \dots, x_{Im}; x_{Im}$ – кількість інтервалів групування відстаней пересувань пасажирів.

Частка мешканців, відстаней пересувань l'_p , яких знаходиться в певному інтервалі, може бути знайдена як різниця значень функції показникового розподілу в точках, що відповідають межах даного інтервалу:

$$P\{l'_{ij}^{(\Delta_I)}\} = P\{l_{ij} \in \Delta_I\} = P\{l_{ij} \in (\Delta_I^H; \Delta_I^E)\} = Z(\Delta_I^E) - Z(\Delta_I^H), \quad (2)$$

де $P\{l'_{ij}^{(\Delta_I)}\} = P\{l_{ij} \in \Delta_I\}$ – ймовірність того, що відстань пересування l_{ij} буде знаходитись в інтервалі Δ_I ; $Z(\Delta_I^E), Z(\Delta_I^H)$ – значення функції розподілу l'_p в точках Δ_I^E та Δ_I^H відповідно.

Відповідно до цього сумарна кількість пересувань $H^{(\Delta_I)}$, які повинні здійснюватися на відстань з певного інтервалу Δ_I може бути визначена як

$$H^{(\Delta_I)} = P\{l'_{ij}^{(\Delta_I)}\} \cdot H, \quad (3)$$

де H – загальна кількість кореспонденцій за період, що розглядається, пас.

Таким чином, для отримання МПК потрібно знайти такий розподіл кореспонденцій, що відповідає системі обмежень

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m h_{ij} = HO_i, & \sum_{j=1}^m h_{ij} = HP_j; \\ \sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}} h_{ij}^{(\Delta_I)} = H^{(\Delta_I)}, & i \neq j, \quad I = 1, 2, \dots, x_{Im}; \\ \sum_{I=1}^{x_{Im}} H^{(\Delta_I)} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m h_{ij} = H, \end{cases} \quad (4)$$

де h_{ij} – шукані кореспонденції між ТР i та j , пас., $h_{ij} \geq 0$; HO_j, HP_i – місткості ТР з прибуття та відправлення пасажирів, пас.; $h_{ij}^{(\Delta_I)}$ – кореспонденції з числа h_{ij} , які реалізуються на відстані $l_p^{(\Delta_I)}$.

Система обмежень (4) є системою лінійних рівнянь, яка має декілька рішень, тому що кількість рівнянь значно менша за кількість змінних. Це підтверджує доцільність використання ІК для розрахунку потреб населення в пересуваннях. Для отримання МПК, які б задовольняли обмеженням (4), у програмному середовищі MS Excel був розроблений алгоритм, блок-схема якого наведена на рис. 1.

На першому етапі розрахунку здійснюється перевірка збалансованості місткостей ТР з відправлення та прибуття пасажирів $\sum_{i=1}^m HO_i = \sum_{j=1}^m HP_j = H; i, \dots, m; j, \dots, m$ та фактичного розподілу пересувань згідно значенню функції показникового розподілу в межах заданих інтервалів загальній кількості пересувань між ТР $\sum_{I=1}^{x_{Im}} H^{(\Delta_I)} = H$.

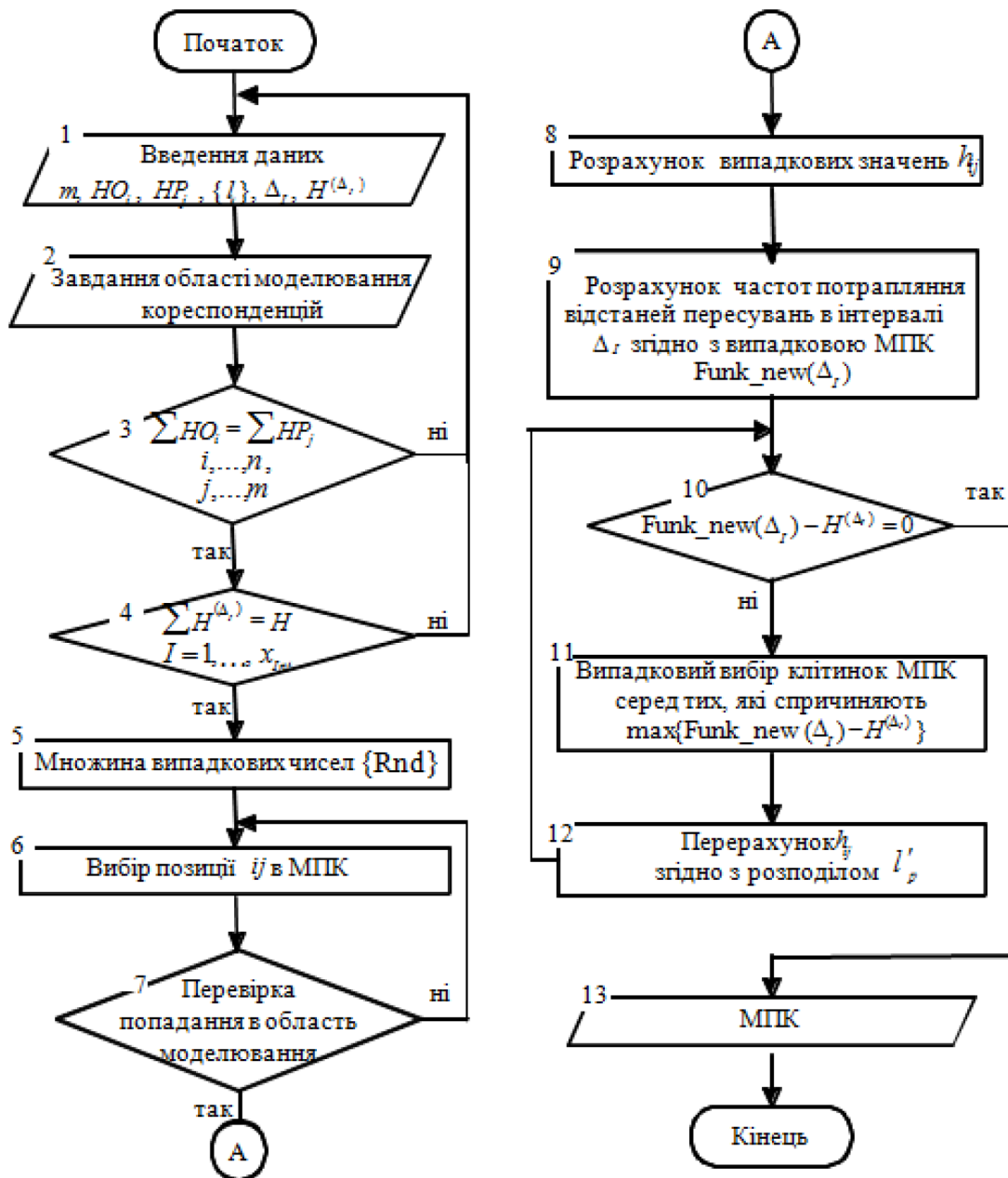


Рис. 1. Блок-схема алгоритму розрахунку МПК згідно з фактичним розподілом відстаней поїздок

На наступному етапі здійснюється заповнення матриці на основі генератора випадкових чисел. Далі здійснюється вибір позиції в матриці та перевірка попадання його в задану область моделювання, яка відповідає значенням згідно (1) та розрахунок випадкового значення h_{ij} в МПК.

Згідно випадковій МПК та матриці найкоротших відстаней розраховується частота потрапляння відстаней пересування $h_{ij}^{(\Delta_t)}$ в межах певного інтервалу Δ_t , а далі здійснюється перевірка відповідності фактичним частотам l'_p . Кінцевим результатом заповненні клітинок МПК є отримання випадкових матриць, що відповідають фактичному розподілу l'_p .

Висновки

Запропонована методика формування моделей транспортного попиту на пересування населення ГТ у приміському сполученні базується на врахуванні фактичних закономірностей у відстанях пересувань. У межах ІК це дозволяє звузити діапазон можливих станів МПК за рахунок використання лише тих матриць, що відповідають фактичним закономірностям розподілу відстані поїздок пасажирів. Звуження меж можливого діапазону станів МПК сприяє отриманню надійної основи для оцінювання результатів реалізації можливих варіантів розвитку прилеглих до міських територій.

Список використаної літератури

1. Кочина А. А. Формування пасажиропотоків у приміському сполученні на автомобільному транспорті : дис. канд. техн. наук : 05.22.01. Харків: ХНАДУ, 2020. 227 с.
2. Кристопчук М. Є., Лобашов О. О. Приміські пасажирські перевезення : монографія. Харків, 2012. 223 с.
3. Пашкевич С. М., Макарічев О. В., Свічинський С. В., Козак С. В. Аналітичний опис розподілу дальності міських пересувань до міжміського автовокзалу. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2023. 4(87). С. 100–109. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.12>
4. Свічинський С. В. Формування функції розселення міського населення для визначення потреб у перевезеннях громадським транспортом: дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01. Харків : ХНАДУ, 2015. 223 с.
5. Методичні рекомендації з визначення існуючої та прогнозування перспективної інтенсивності руху: МР А.2.1-218-02070915-729. Київ, 2008. 25 с.
6. Методика економічних вишукувань для проектування автомобільних доріг: М 218-05416892-409. Київ, 2004. 34 с.
7. Ortuzar J. D., Willumsen L. G. *Modelling Transport*. [Third Edition]. Chichester: Wiley. 2006. 499 p.
8. Tilahun N. Y., Levinson D. M., Tilahun N. Y. Selfishness and Altruism in the Distribution of Travel Time and Income. *1th International Association of Travel Behaviour Research Conference in Kyoto, August 2006* : working papers. Minnesota. 2006. P. 1–19.
9. Tampa Bay Regional Planning Model Cube Voyager Conversion: Tech. Rep. No. 1, Validation Rep. Dept. of Transportation, Gannett Fleming. Project ID No. 259173-1-12-05. Florida, 2004. 162 p.
10. Moeckel R. Constraints in household relocation: Modeling land-use/transport interactions that respect time and monetary budgets. *Journal of Transport and Land Use*. 2017. 10(1). P. 211–228. <https://doi.org/10.5198/jtlu.2015.810>
11. Горбачов П. Ф., Макарічев О. В., Кочина А. А. Закономірності розподілу відстаней пересування пасажирів громадського транспорту в приміському сполученні. *Комунальне господарство міст. Серія «Технічні науки та архітектура»*. 2019. 5(151). С. 75–80.

References

1. Kochina, A. A. (2020) Formation of streams of passengers in a suburban report on a motor transport: dys. kand. tekhn. nauk : 05.22.01. Kharkiv : KhNAHU.
2. Krystopchuk, M. Ye., Lobashov, O. O. (2012) Suburban passenger transport : monohraf. Kharkiv.
3. Pashkevych, S. M., Makarichev, O. V., Svichynskiy, S. V., Kozak, S. V. (2023) Analytical Description of the Trip Length Bistribution for Urban Trips to Intercity Bus Station. *Visnyk of Kherson National Technical University*, 4(87), 100–109. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.12>
4. Svichynskiy, S. V. (2015) Formation of urban population settlement functions to determine public transport needs: dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.22.01. Kharkiv : KhNADU.
5. MR A.2.1-218-02070915-729. (2008) Methodological recommendations for determining existing and forecasting future traffic intensity. Kyiv.
6. M 218-05416892-409 (2004.) Methodology of economic research for highway design. Kyiv.
7. Ortuzar, J. D., Willumsen, L. G. (2006) *Modelling Transport*. [Third Edition]. Chichester: Wiley.
8. Tilahun, N. Y., Levinson, D. M., Tilahun, N. Y. (2006) Selfishness and Altruism in the Distribution of Travel Time and Income. *1th International Association of Travel Behaviour Research Conference in Kyoto, August 2006* : working papers. Minnesota, 1–19.
9. Tampa Bay Regional Planning Model Cube Voyager Conversion. (2004) Tech. Rep. No. 1, Validation Rep. Dept. of Transportation, Gannett Fleming. Project ID No. 259173-1-12-05. Florida.
10. Moeckel, R. (2017) Constraints in household relocation: Modeling land-use/transport interactions that respect time and monetary budgets. *Journal of Transport and Land Use*, 10(1), 211–228. <https://doi.org/10.5198/jtlu.2015.810>
11. Horbachov, P. F., Makarichev, O. V., Kochina, A. A. (2019) Law of the distribution of public transport transmitter removal in additional mergers. *Municipal econom of cities*, 5(151), 75–80.

Дата першого надходження статті до видання: 18.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026