

С. М. ПАШКЕВИЧ

старша викладачка кафедри транспортних технологій і технічного сервісу
Національний університет водного господарства та природокористування
ORCID: 0000-0001-7667-8932

О. В. МАКАРІЧЕВ

доктор фізико-математичних наук,
професор кафедри транспортних систем і технічного сервісу
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0003-2442-1208

С. В. СВІЧИНСЬКИЙ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних систем і логістики
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
ORCID: 0000-0002-8549-1712

С. В. КОЗАК

кандидат економічних наук,
доцент кафедри транспортних технологій і технічного сервісу
Національний університет водного господарства та природокористування
ORCID: 0009-0006-3204-1861

АНАЛІТИЧНИЙ ОПИС РОЗПОДІЛУ ДАЛЬНОСТІ МІСЬКИХ ПЕРЕСУВАНЬ ДО МІЖМІСЬКОГО АВТОВОКЗАЛУ

Міжміські автовокзали є одним із видів транспортних пересадочних вузлів, до основних функцій яких відносяться забезпечення пересадок пасажирів із внутрішнього міського транспорту на міжміський. Часто це робить їх досить великими пунктами взаємодії видів транспорту, генеруючи значний обсяг відправлень і прибуттів людей для міського пасажирського транспорту. Внаслідок цього вокзали мають певний вплив на розподіл транспортних і пасажирських потоків міською територією. Оцінка даного впливу потребує визначення попиту городян та гостей міста на пересування до автовокзалу та у зворотному напрямку, але на сьогоднішній день моделюванню саме такого попиту приділяється недостатньо уваги – більшість існуючих підходів до вирішення подібної задачі не містять конкретних рекомендацій та кількісних оцінок впливу розташування вокзалу на міську транспортну систему.

Задля внеску у вирішення зазначеної проблеми у даній статті проведений аналіз відомих напрацювань стосовно роботи автовокзалів як елементів транспортної системи міст, а також підходів до визначення місць їх розташування. За підсумками даного аналізу встановлено, що для моделювання міського транспортного попиту на пересування до міжміських автовокзалів на початковому етапі потрібно дослідити специфіку генерації та поглинання пересувань городян до транспортно-пересадочного вузла. У даному дослідженні було визначено закономірності у відстанях зазначених пересувань у припущенні про нормальний розподіл точок їх генерації та поглинання. У підсумку були отримані функції розподілу відстаней пересувань до автовокзалу та у зворотному напрямку при різних місцях розташування вокзалу та конфігурації зони його впливу. Дані функції є корисними для галузі транспортного моделювання, оскільки можуть бути використані для розрахунку матриць кореспонденції, котрі відбиватимуть пересування користувачів міжміських транспортно-пересадочних вузлів по місту.

Ключові слова: автовокзал, транспортний попит, транспортна система, міські пасажиропотоки, розподіл відстаней пересувань.

S. M. PASHKEVYCH

Senior Lecturer at the Department of Transport Technologies
and Technical Service
National University of Water and Environmental Engineering
ORCID: 0000-0001-7667-8932

O. V. MAKARICHEV

D.Sc. in Physics and Mathematics,
Professor at the Department of Transport Systems and Technical Service
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0003-2442-1208

S. V. SVICHYNSKYI

Ph.D. in Transport Systems, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Systems and Logistics
Kharkiv National Automobile and Highway University
ORCID: 0000-0002-8549-1712

S. V. KOZAK

Ph.D. in Economics,
Associate Professor at the Department of Transport Technologies
and Technical Service
National University of Water and Environmental Engineering
ORCID: 0009-0006-3204-1861

ANALYTICAL DESCRIPTION OF THE TRIP LENGTH DISTRIBUTION FOR URBAN TRIPS TO INTERCITY BUS STATION

Intercity bus stations belong to the interchange hubs, the main functions of which include providing passengers with options for interchanging between internal urban transport and intercity transport. This often makes them large points of transport modes interaction and generates a significant volume of departures and arrivals for urban passenger transport. As a result, stations have a meaningful impact on the distribution of transport and passenger flows in an urban area. The assessment of this impact requires determining the demand of citizens and city visitors for travelling to and from the bus station, but to date, insufficient attention has been paid to corresponding demand modelling – most existing approaches to solving this task do not contain specific recommendations and quantitative measures to assess the impact of the station location on an urban transport system.

In order to contribute to solving this problem, this paper analyses the known developments regarding the operation of bus stations as elements of an urban transport system, as well as approaches to determine their location. Based on the results of this analysis, it is established that at the initial stage, to model urban transport demand for travelling to intercity bus stations, it is necessary to study the specifics of the generation and attraction of citizens' trips to an intercity transport hub. This study was carried out by examining the patterns in these trip distances under the assumption of the normal distribution of their generation and attraction points on the city territory. As a result, the trip length distribution functions for the trips to and from a bus station were obtained for different station locations and the configuration of its zone of influence. These functions are useful for the transport modelling field since they can be used to calculate origin-destination matrices that reflect the trips of intercity transport hub users around the city.

Key words: bus station, transport demand, transport system, urban passenger flows, trip length distribution.

Постановка проблеми

Останніми роками у багатьох містах України збільшилась увага місцевих муніципалітетів до питань сталої міської мобільності. У цьому контексті серед шляхів зниження навантаження на вулично-дорожню мережу (ВДМ) і покращення екологічної ситуації розглядаються відведення потоків індивідуального транспорту (ІТ) городян та міжміських, у тому числі транзитних транспортних потоків (ТП) від центральної частини на периферію міста [1–4] за рахунок планування будівництва нових міжміських автовокзалів у відповідних місцях або ж перенесення існуючих [5].

За своїм функціональним призначенням міжміські автовокзали відносяться до транспортно-пересадочних вузлів (ТПВ), адже вони, окрім іншого, забезпечують комфортну пересадку між зовнішнім та внутрішнім міським транспортом. Згідно з ДБН Б.2.2-12:2019 «Планування та забудова територій», до їх складу слід включати місця для очікування пасажирів, стоянки таксі, перехоплюючі стоянки транспортних засобів (ТЗ), місця тимчасового зберігання автомобілів, велостоянки тощо [6]. Технічні параметри даних елементів інфраструктури ТПВ слід визначати, спираючись на пересадочні пасажиропотоки та пасажирообмін зупиночних пунктів (ЗП) у ТПВ з урахуванням рухомості населення міста.

Це вказує на потребу прогнозування попиту міського населення на пересування та встановлення тієї величини попиту, котра відповідає переміщенням містом саме до та з ТПВ. Актуальність вирішення даної задачі підкреслюється тим, що знання попиту на пересування є необхідним для реалізації сучасних принципів транспортного планування, адже створення чи релокація міжміських ТПВ має велику вартість і вплив на міську транспортну систему (ТС).

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогоднішній день існує велика кількість досліджень процесу пересувань пасажирів, які реалізуються за участі ТПВ. Наприклад, у дисертації [7] розглядаються процеси взаємодії у міських ТПВ, в яких приймають участь пасажирів і маршрутні ТЗ. Моделювання попиту на поїздки, що починаються або продовжуються у ТПВ, відбувається із використанням двоетапної процедури, котра враховує кількісні і часові параметри процесів, які відбуваються у вузлі: прибуття пасажирів до ТПВ представляється найпростішим потоком; приймаються до уваги

ймовірні пересадки між маршрутними ТЗ при транзитних поїздках; при розподілі пасажирів між ТЗ різних маршрутів враховуються параметри вхідного потоку маршрутних ТЗ та час їх перебування у вузлі, котрий залежить від інтервалу руху. Перший етап процедури передбачає визначення кількості пасажирів, що накопичуються у ТПВ протягом певного періоду часу. На другому етапі здійснюється їх розподіл між маршрутними ТЗ. Відповідно, результати роботи [7] є корисними скоріше на рівні мікромоделювання роботи ТПВ, аніж на рівні моделювання пасажиропотоків у міській ТС.

У роботі [8], яка присвячена питанням організації приміських пасажирських перевезень, відзначається важлива роль автостанцій як елемента інфраструктури приміської ММ, котрий забезпечує обслуговування пасажирів при поїздках автобусними маршрутами загального користування та покликаний створити умови для своєчасної та зручної пересадки. У роботі [9] наведений існуючий поділ автостанцій за класами, для котрих зазначено орієнтовну добову кількість відправлень автобусів, але не приділено увагу прогнозуванню обсягу пересувань міського населення, котре буде користуватися даними автобусами. Питання моделювання транспортного попиту тут розглянуті узагальнено та стосуються визначення загальної кількості пересувань приміськими маршрутами. Для прогнозування пересувань пропонується використовувати рухомість населення залежно від дальності поїздок та мети, щільність населення у населених пунктах області, функцію розселення та модифіковану гравітаційну модель розрахунку матриць кореспонденцій (МК). Як функцію розселення пропонується використовувати показниковий розподіл кількості мешканців населених пунктів залежно від їх віддалення від певного центру тяжіння або розподіл щільності населення, що проживає в межах площі обслуговування приміського маршруту залежно від віддалення від певного центру тяжіння [8]. При цьому даний підхід до прогнозування пересувань приміськими маршрутами не дає оцінки впливу цих пересувань на міські ТП.

Дослідженню функціонування ТПВ, через які проходять приміські та міжміські маршрути, а також їх впливу на ТС міста, присвячена робота [10]. У ній презентовано підхід до визначення «притягуючої здатності ТР», яка вважається вихідною інформацією для визначення міської МК ГТ. Дане дослідження отримало розвиток у роботах [11, 12] та дисертації [13], в результаті чого на основі опитування користувачів приміських та міжміських автовокзалів і залізничних станцій було розраховано коефіцієнти мультиноміальних логіт-моделей вибору ТПВ та виду міського транспорту для пересування до нього. При цьому для оцінки кількості пересувань міського населення до та з ТПВ запропоновано використовувати характеристики їх функціонування при визначенні місткостей міських ТР з відправлення та прибуття пасажирів та гравітаційну модель розрахунку МК.

У статті [14] розгляд питання визначення попиту на міські пересування, пов'язані з міжміським ТПВ, обмежується визначенням загальної кількості пасажирів, що пересаджуються на ГТ міста. Розрахунок відбувається на основі середньої кількості пасажирів, що вивозяться із ТПВ транспортними засобами ГТ, кількості зупинок ГТ у ТПВ та їх пропускну здатності.

Стаття [15] присвячена визначенню підходів до рішення задач розташування ТПВ і прогнозу обумовлених ним потоків транспорту та пасажирів. Тут усереднені характеристики руху пасажирських потоків пропонується визначати на основі розподілу кореспонденцій за гравітаційною моделлю, а транспортних – спираючись на рівноважний розподіл.

Що стосується результатів досліджень, опублікованих у іноземних виданнях, то вони здебільшого присвячені вивченню факторів впливу на привабливість міжміських та приміських ТПВ та у меншому ступені торкаються задач визначення попиту на міські поїздки до таких вузлів [16, 17].

Питань попиту городян на послуги ТПВ також торкаються роботи [18, 19]. У книзі [18] зазначається, що попит на поїздки до ТПВ є чутливим до швидкості видів транспорту, котрими можна туди дістатися. Робота [19] містить цілий перелік факторів, котрі, на думку її авторів, мають значний вплив на поїздки до та з ТПВ і включають дохід пасажирів, їх стать, час очікування при поїздки, час та вартість самої поїздки, рівень комфорту у салоні ТЗ та доступність різних видів транспорту для пересування до ТПВ. При цьому жодна з робіт не описує способів визначення впливу місця розташування ТПВ на міські пересування.

Варто зазначити, що як вітчизняні, так і зарубіжні дослідники погоджуються з тим, що рішення про місце розташування міжміських та приміських автовокзалів є доволі важливим для міста. Воно впливає на ефективність роботи ТС різних видів міського транспорту, функціонування ВДМ, рівень транспортного обслуговування населення, розподіл пасажирських і транспортних потоків [3, 4, 20]. У проаналізованих роботах вказується можливість та доцільність застосування функцій розселення та відомих моделей розрахунку кореспонденцій для прогнозування транспортного попиту, пов'язаного із користуванням ТПВ, але в той же час відсутні конкретні рекомендації та кількісні оцінки впливу розташування вузлів на міську ТС і пересування городян та гостей міста у ній.

Підбиваючи підсумок під проведеним аналізом, можна стверджувати, що задача кількісної оцінки впливу місця розташування міжміського автовокзалу в плані міста на міські пасажиропотоки залишається на сьогоднішній день без належної уваги. Для її якісного вирішення потрібно дослідити специфіку генерації та поглинання пересувань городян до міжміського ТПВ, що можна зробити за рахунок вивчення закономірностей у відстанях таких пересувань.

Формулювання мети дослідження

Закономірності впливу локації ТПВ на розподіл транспортного попиту у міській ТС можна отримати при дослідженні характеристик розташування на території міста точок генерації та поглинання пересувань, зумовлених потребами прямування на автовокзал та у зворотному напрямку. Розташування даних точок задає розподіл дальності досліджуваних пересувань населення міською територією. З огляду на корисність даного розподілу, відзначену при аналізі літературних джерел, метою даної статті буде його аналітичний опис у залежності від місця розташування автовокзалу.

Для цього можна відштовхнутись від факту, встановленого у роботі [21], у якій доведено, що розміщення точок генерації та поглинання суто внутрішньоміських пересувань громадським транспортом (ГТ) добре описується нормальним розподілом кожної з горизонтальних координат таких точок. Ці самі закономірності, поза всяким сумнівом, можуть бути поширені й на індивідуальний транспорт [21–23] для рутинних пересувань на території міста. Добирання, пов'язані із реалізацією потреб у міжміських поїздках, є не дуже частими і дещо специфічними пересуваннями, але гіпотеза про нормальність розподілу місць тяжіння по території міста для них також виглядає достатньо логічною, адже:

- при користуванні для таких добирань громадським транспортом, котрий є основним постачальником перевізних послуг для населення міст України, точки зародження і поглинання пересувань до та з автовокзалу – зупинки ГТ – будуть співпадати з аналогічними точками при міських пересуваннях, для яких нормальність розташування вже є доведеною [21], Тут варто додати, що широке використання ГТ для поїздок в українських містах зумовлює той факт, що більшість місць генерації є спільними або просторово близькими для пасажирів громадського та індивідуального транспорту (ІТ). Тому навіть при використанні ІТ для добирання та повернення з автовокзалу є підстави вважати, що закономірності у розташуванні місць відправлення і прибуття для пересувань ІТ будуть спільними із закономірностями, отриманими стосовно ГТ;

- до експериментальної перевірки не можна виключати можливість схожості характеристик міських частин міжміських пересувань з характеристиками власне міських пересувань;

- розповсюдженню практикою є сумісне обслуговування автовокзалами міжміських та приміських маршрутів, а пасажиропотоки на останніх є досить схожими на міські за місцями генерації на території міста. В додаток до цього, в дисертації [24] було доведено, що закономірність розподілу відстаней між місцями зародження та поглинання приміських пересувань є продовженням аналогічної закономірності, яка існує на території міста;

- генерація і притягування пересувань є частиною процесу формування і реалізації транспортного попиту, котрий знаходиться під впливом багатьох факторів подекуди невідомої для дослідників природи.

Отже, дана стаття буде присвячена аналітичному опису дальності пересувань на автовокзал та у зворотному напрямку в залежності від місця розташування автовокзалу на території міста за умови нормальності розподілу горизонтальних координат точок генерації та поглинання пересувань у місті.

Викладення основного матеріалу дослідження

Аналітична модель дальності міських пересувань до та з автовокзалу

Для побудови аналітичної моделі міську територію доцільно представити декартовою площиною XOY і висунути гіпотезу про те, що щільність розподілу точок генерації по ній має обмежений межами міста круговий нормальний розподіл із щільністю

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma^2}\right], \quad (1)$$

де (x, y) – координати (абсциси та ординати) точок генерації (поглинання) на міській території;

σ – середньоквадратичне (стандартне) відхилення координат точок на міській території.

Для аналітичного опису розподілу дальності пересування з міста до ТПВ та у зворотному напрямку найпростішим є випадок розташування автовокзалу у центрі розсіювання пунктів генерації. При такому розташуванні ймовірність здійснення пересувань певної відстані до та з автовокзалу із зоною впливу, площу якої можна представити фігурою A на згаданій площині XOY , складатиме

$$P(A) = \iint_A \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma^2}\right] dx dy. \quad (2)$$

Для зручності подальших перетворень доцільно перейти до представлення розглядуваних точок і пересувань із та до них у полярній системі координат. Нехай полярна вісь у такій системі співпадає із додатною піввіссю OX та перехід від декартової системи координат до полярної здійснюється по формулах

$$\begin{cases} x = \rho \cos \varphi; \\ y = \rho \sin \varphi. \end{cases} \quad (3)$$

де ρ – радіальна координата точки у полярній системі, що є відстанню від початку координат до точки;

φ – кутова координата (полярний кут) точки у полярній системі.

Після підстановки рівностей (3) у формулу (1) щільність кругового нормального розподілу на площині у полярній системі координат матиме вид

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{\rho^2}{2\sigma^2}\right], \quad dx dy = \rho d\varphi d\rho. \quad (4)$$

Відповідно, ймовірність знаходження якоїсь точки генерації у певній фігурі A на площині з круговим нормальним розподілом у полярній системі координат дорівнюватиме

$$P(A) = \iint_A \frac{\rho}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{\rho^2}{2\sigma^2}\right] d\varphi d\rho \quad (5)$$

Нехай фігура A є зоною впливу автовокзалу, яка має форму круга радіусу R із центром у початку координат:

$$A = \{(x, y) : x^2 + y^2 \leq R\} \quad (6)$$

або у полярній системі координат

$$A = \{(\rho, \varphi) : \rho \leq R, 0 \leq \varphi < 2\pi\} \quad (7)$$

Це відповідає випадку розташування автовокзалу у географічному центрі міста і не виключає можливості того, що зона впливу автовокзалу повністю покриватиме міську територію, умовно представлену кругом радіусу R . Тоді функція розподілу відстаней пересувальців із міської території до автовокзалу і в зворотному напрямку матиме вид

$$\begin{aligned} P(A) &= \frac{1}{2\pi\sigma^2} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^R \rho \cdot \exp\left[-\frac{\rho^2}{2\sigma^2}\right] d\rho = \left. \begin{array}{l} \rho = \sigma t \\ d\rho = \sigma dt \\ 0 \leq t \leq \frac{R}{\sigma} \end{array} \right| \\ &= \frac{2\pi}{2\pi\sigma^2} \int_0^{\frac{R}{\sigma}} \sigma \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \cdot \sigma dt = \int_0^{\frac{R}{\sigma}} t \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt = \\ &= \left. \begin{array}{l} u = \frac{t^2}{2} \\ du = t dt \\ 0 \leq u \leq \frac{R^2}{2\sigma^2} \end{array} \right| = \int_0^{\frac{R^2}{2\sigma^2}} \exp(-u) du = 1 - \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma^2}\right). \end{aligned} \quad (8)$$

Отримана залежність є простою, інтуїтивно зрозумілою і дозволяє відстежити роль стандартного відхилення в цьому розподілі – воно визначає частину розподілу, яка відноситься до території міста і, відповідно, поза нею. Це є цікавим фактом для експериментальної перевірки гіпотези, оскільки вагомий неврахований хвіст розподілу може викликати сумніви в її правдоподібності.

Більш складним для аналітичного моделювання є випадок локації вокзалу не у міському центрі. Для його розгляду слід ввести додаткове поняття зони впливу автовокзалу, що знаходиться у межах міської території і з якої виконуються пов'язані з ним пересування. Така зона впливу може мати площу меншу або рівну площі міської території.

Нехай точка O є центром круга, яким умовно можна представити територію міста і в якому населення розподілене нормально, а точка O_1 є центром тяжіння – автовокзалом, – яка лежить на полярній осі (рис. 1).

Відстань між цими двома точками можна позначити через d , тобто $|OO_1| = d$. Далі можна накреслити умовну зону впливу автовокзалу – окружність із центром у точці O_1 радіусу x – і розглянути ситуацію коли $0 < d < R/2$ та $0 < x < d$. При такому розташуванні і конфігурації зони впливу круг із центром у точці O_1 та радіусом x розташований усередині круга радіусу R (рис. 1). Поїздки населення у даному випадку можна розглядати як такі, котрі тяжіють до (з) точки O_1 (автовокзалу) з відстані (на відстань), що не більша за x . Для того, щоб знайти ймовірність здійснення пересування такої відстані у межах зазначеного круга, необхідно записати подвійний інтеграл. Для його зведення до повторного інтегралу необхідно знайти межі зміни полярного кута та полярного радіусу у цьому крузі із центром у точці O_1 та радіусом x . Задля цього з точки O потрібно провести дотичну OK (K – точка дотику) до межі даного круга – кола із центром у точці O_1 та радіусом x , рис. 1.

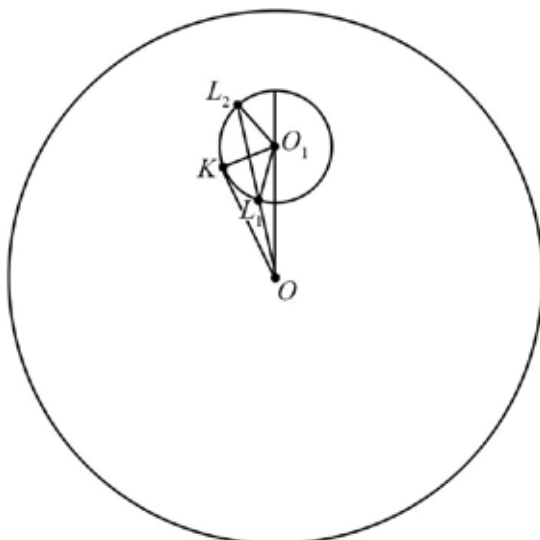


Рис. 1. Схематичне зображення розташування автовокзалу на відстані від центру міста із коловою зоною впливу, що знаходиться у межах міської території

Далі величину кута O_1OK у радіанах можна позначити як φ_{\max} та у прямокутному трикутнику O_1KO знайти синус даного кута як відношення довжини протилежного йому катета до довжини гіпотенузи:

$$\sin \varphi_{\max} = \frac{|O_1K|}{|OO_1|} = \frac{x}{d}. \tag{9}$$

Звідси

$$\varphi_{\max} = \arcsin\left(\frac{x}{d}\right). \tag{10}$$

Таким чином, у крузі з центром в точці O_1 радіуса x полярний кут змінюється у межах від $-\varphi_{\max}$ до φ_{\max} , тобто $-\varphi_{\max} \leq \varphi \leq \varphi_{\max}$.

Поточний промінь із точки O всередині кута O_1OK перетне межу круга – коло із центром в точці O_1 радіуса x – послідовно в точках L_1 і L_2 (рис. 1). Для визначення меж інтегрування полярного радіуса у шуканому повторному інтегралі необхідно знайти довжини відрізків OL_1 і OL_2 (рис. 1).

Нехай кут O_1OL_1 (рис. 1) рівний φ – поточному куту. Величину кута OL_1O_1 (рис. 1) можна позначити через δ . Оскільки сума внутрішніх кутів трикутника дорівнює π , кут OO_1L_1 (рис. 1) рівний у радіанах величині $(\pi - \varphi - \delta)$ і по формулі приведення $\sin(\pi - \varphi - \delta) = \sin(\varphi + \delta)$. З теореми синусів для трикутника OO_1L_1 (рис. 1)

$$\frac{\sin(\pi - \varphi - \delta)}{|OL_1|} = \frac{\sin \varphi}{x} = \frac{\sin \delta}{d} \tag{11}$$

або

$$\frac{\sin(\varphi + \delta)}{|OL_1|} = \frac{\sin \varphi}{x} = \frac{\sin \delta}{d}, \tag{12}$$

звідки

$$\sin \delta = \frac{d \sin \varphi}{x} \tag{13}$$

і

$$|OL_1| = \frac{x \sin(\varphi + \delta)}{\sin \varphi} = \frac{x(\sin \varphi \cos \delta + \cos \varphi \sin \delta)}{\sin \varphi}. \tag{14}$$

У дану формулу доцільно підставити вираз (13), а також

$$\cos \delta = -\sqrt{1 - \sin^2 \delta} = -\sqrt{1 - \left(\frac{d \sin \varphi}{x}\right)^2}, \tag{15}$$

адже за побудовою кут OL_1O_1 , тобто δ , є тупим і його косинус є від’ємним числом. Таким чином виходить, що

$$\begin{aligned}
 |OL_1| &= \frac{x(\sin \varphi \cos \delta + \cos \varphi \sin \delta)}{\sin \varphi} = \\
 &= \frac{x \left(\sin \varphi \cdot \left[-\sqrt{1 - \left(\frac{d \sin \varphi}{x} \right)^2} + \cos \varphi \cdot \left(\frac{d \sin \varphi}{x} \right) \right]}{\sin \varphi} = \\
 &= x \left(-\sqrt{1 - \left(\frac{d \sin \varphi}{x} \right)^2} + \cos \varphi \left(\frac{d}{x} \right) \right) = -\sqrt{x^2 - (d \sin \varphi)^2} + d \cos \varphi.
 \end{aligned} \tag{16}$$

Отриману залежність можна позначити через $\rho_1(\varphi)$ і остаточно записати

$$\rho_1(\varphi) = |OL_1| = d \cos \varphi - \sqrt{x^2 - (d \sin \varphi)^2}. \tag{17}$$

Далі, виходячи із прямокутного трикутника O_1OK (рис. 1) і теореми Піфагора, можна записати, що $|OK|^2 = |OO_1|^2 - |O_1K|^2 = d^2 - x^2$. В той же час $|OK|^2 = |OL_1| \cdot |OL_2|$, оскільки із відомої теореми планіметрії квадрат довжини відрізка дотичної до кола рівний добутку довжин відрізків січної. Спираючись на ці дві рівності можна записати наступне:

$$|OL_2| = \frac{|OK|^2}{|OL_1|} = \frac{d^2 - x^2}{|OL_1|}, \tag{18}$$

де $|OL_1| = \rho_1(\varphi) = d \cos \varphi - \sqrt{x^2 - (d \sin \varphi)^2}$ є отриманою раніше нижньою межею зміни полярного радіуса. Відповідно,

$$|OL_2| = \frac{|OK|^2}{|OL_1|} = \frac{d^2 - x^2}{|OL_1|} = \frac{d^2 - x^2}{\rho_1(\varphi)} = \frac{d^2 - x^2}{d \cos \varphi - \sqrt{x^2 - (d \sin \varphi)^2}} = \rho_2(\varphi) \tag{19}$$

є верхньою межею зміни полярного радіуса.

В результаті ймовірність здійснення пересування до автовокзалу – точки O_1 – з відстані, що не більша за радіус зони його впливу x , коли $0 < x < d$, рівна

$$\begin{aligned}
 F(x) &= \left[1 - \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma^2}\right) \right]^{-1} \int_{-\varphi_{\max}}^{\varphi_{\max}} d\varphi \int_{\rho_1(\varphi)}^{\rho_2(\varphi)} \frac{\rho}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{\rho^2}{2\sigma^2}\right] d\rho = \\
 &= 2 \left[1 - \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma^2}\right) \right]^{-1} \int_0^{\varphi_{\max}} d\varphi \int_{\rho_1(\varphi)}^{\rho_2(\varphi)} \frac{\rho}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{\rho^2}{2\sigma^2}\right] d\rho = \\
 &= \left[1 - \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma^2}\right) \right]^{-1} \int_0^{\varphi_{\max}} d\varphi \int_{\rho_1(\varphi)}^{\rho_2(\varphi)} \frac{\rho}{\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{\rho^2}{2\sigma^2}\right] d\rho,
 \end{aligned} \tag{20}$$

або

$$\begin{aligned}
 F(x) &= k \int_0^{\varphi_{\max}} d\varphi \int_{\rho_1(\varphi)}^{\rho_2(\varphi)} \frac{\rho}{\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{\rho^2}{2\sigma^2}\right] d\rho = \left. \begin{aligned} &u = \rho^2/2\sigma^2 \\ &du = \frac{\rho}{\sigma^2} d\rho \\ &u_1(\varphi) = \rho_1^2(\varphi)/2\sigma^2 \\ &u_2(\varphi) = \rho_2^2(\varphi)/2\sigma^2 \end{aligned} \right| = \\
 &= k \int_0^{\varphi_{\max}} d\varphi \int_{u_1(\varphi)}^{u_2(\varphi)} \frac{1}{\pi} \exp[-u] du = \frac{k}{\pi} \int_0^{\varphi_{\max}} \{ \exp[-u_1(\varphi)] - \exp[-u_2(\varphi)] \} d\varphi = \\
 &= \frac{k}{\pi} \int_0^{\varphi_{\max}} \left\{ \exp\left[-\frac{\rho_1^2(\varphi)}{2\sigma^2}\right] - \exp\left[-\frac{\rho_2^2(\varphi)}{2\sigma^2}\right] \right\} d\varphi,
 \end{aligned} \tag{21}$$

де $k = \left[1 - \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma^2}\right) \right]^{-1}$.

У підсумку функція розподілу відстаней пересувань до автовокзалу при $0 < x < d < R/2$ матиме вигляд

$$F(x) = \frac{\left[1 - \exp\left(-\frac{R^2}{2\sigma^2}\right)\right]^{-1}}{\pi} \int_0^{\varphi_{\max}} \left\{ \exp\left[-\frac{\rho_1^2(\varphi)}{2\sigma^2}\right] - \exp\left[-\frac{\rho_2^2(\varphi)}{2\sigma^2}\right] \right\} d\varphi \quad (22)$$

де φ_{\max} представляється виразом (10), $\rho_1(\varphi)$ – виразом (17), $\rho_2(\varphi)$ – виразом (19).

Аналогічним чином можна отримати вирази для функції розподілу $F(x)$, коли для конфігурації зони впливу автовокзалу $d \leq x < R-d$ і коли $R-d \leq x < R+d$, а також для ситуації більшої віддаленості автовокзалу від центра міста, при якій $R/2 \leq d < R$.

Підсумовуючи викладене, можна стверджувати, що отримані аналітичні залежності (8) і (22) відбивають вплив місця розташування автовокзалу на розподіл дальності пов'язаних з ним пересувань. За умови експериментального підтвердження їхньої коректності, вони можуть стати основою для розрахунку матриці кореспонденцій, котра відбиватиме пересування користувачів міжміських ТПВ по місту.

Висновки

На сьогоднішній день задача кількісної оцінки впливу місця розташування міжміського автовокзалу в плані міста на міські пасажиропотоки залишається без належної уваги. З метою її вирішення були отримані аналітичні вирази функції розподілу відстаней пересувань з міської території до автовокзалу та у зворотному напрямку залежно від його місця розташування та у рамках гіпотези про нормальність розподілу місць тяжіння зазначених пересувань. Ці вирази можуть бути застосовані для побудови транспортних моделей, зокрема при розрахунку матриць кореспонденцій.

Наступним кроком повинна стати експериментальна перевірка зазначених функцій розподілу, для чого потрібно зібрати інформацію про добирання городян та гостей міста з та до автовокзалу. Позитивні результати такої перевірки забезпечать транспортних планувальників інструментом для моделювання міського транспортного попиту, що створюється користувачами міжміських ТПВ.

У разі ж спростування гіпотези про нормальність розподілу координат пунктів відправлення і тяжіння пасажирів міжміського сполучення на території міста доцільним буде використання інших відомих статистичних розподілів, придатних для опису координат пунктів відправлення і призначення поїздок, пов'язаних із прямуманням містом на автовокзал та у зворотному напрямку.

Список використаної літератури

1. Дульфан С.Б. Про доцільність влаштування перехоплюючих парковок у м. Харкові. Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура. 2014. Вип. 116. С. 89–92.
2. Дульфан С.Б. Закономірності впливу «перехоплюючих» парковок на формування транспортних потоків (на прикладі м. Харкова) : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01. Харків, 2016. 25 с. URL: https://radats.kname.edu.ua/images/Files/aref_dulfan.pdf.
3. Дронова О., Боклаг Є. Вплив транспортної системи Києва на життя і мобільність його жителів. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Географія. 2017. Вип. 2(67). С. 94–100. DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2721.2017.66.14>.
4. Крепка І.О., Марковський А.І. Класифікація пасажирських транспортних хабів. Теорія та практика дизайну: зб. наук. праць. Архітектура та будівництво. 2022. Вип. 26. С. 53–60. DOI: <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2022.26.7>.
5. У великих містах будуть створюватися транспортно-пересадочні вузли для зручної та швидкої пересадки пасажирів між різними видами транспорту : Урядовий портал – Єдиний веб-портал органів виконавчої влади України. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/u-velikih-mistah-budut-stvoryuvatisya-transportno-peresadochni-vuzli-dlya-zruchnoyi-ta-shvidkoji-peresadki-pasazhiriv-mizh-riznimi-vidami-transportu-lev-parchaladze> (дата звернення: 06.04.2023).
6. ДБН Б.2.2-12:2019. Планування та забудова територій. [введ. 2019-01-10]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2019. 185 с.
7. Вдовиченко В.О. Розвиток науково-технологічних основ взаємодії міського пасажирського транспорту в транспортно-пересадочних вузлах : дис. ... докт. техн. наук : 05.22.01. Харків, 2019. 472 с.
8. Кристопчук М.С., Лобашов О.О. Приміські пасажирські перевезення: навч. посібник. Харків: НТМТ, 2012. 224 с.
9. Про затвердження Порядку регулювання діяльності автостанцій : Наказ Мінтрансзв'язку України від 27.09.2010 № 700. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1068-10#Text> (дата звернення: 31.03.2023).
10. Жук М.М., Півторак Г.В. Оцінка притягуючої здатності вузлів зовнішнього транспорту Львова. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2019. Том 30 (69), Ч. 2, № 6. С. 162–169. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.6-2/29>.

11. Жук М.М., Півторак Г.В., Гіць І.І., Козак М.М. Прогнозування вибору виду транспорту у разі міських переміщень на основі класифікаційних дерев рішень. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2020. Том 31 (70), № 4. С. 221–226. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/32>.
12. Півторак Г.В., Голомовий В.М., Жила М.П. Оцінка впливу зміни параметрів функції переваги на розподіл попиту на переміщення між транспортними районами міста. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2020. № 2 (15). С. 118–126. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i15.399>.
13. Півторак Г.В. Визначення параметрів мережі міських пасажирських перевезень на основі моделей теорії корисності з випадковим вибором : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01. Львів, 2021. 202 с.
14. Стрелко О.Г., Торопов Б.І., Грушевська Т.М., Войцехович В.С., Поповичук Т.О. Дослідження впливу пасажиропотоків на пропускну спроможність транспортних пересадочних вузлів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Том 33 (72) № 4. С. 271–277. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/41>.
15. Хітров І.О., Кристопчук М.Є. Закономірності формування і розподілу транспортних та пасажирських потоків. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2020. Вип. 3(34). С. 324–330. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).324-330](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).324-330).
16. Abdullah A., Yudono A., Adisasmita S.A., Akil A. Determination of Transit Service Accessibility Standard for Intercity Bus Passengers, *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*. 2019. Vol. 7, Issue 2, P. 92–105. DOI: https://doi.org/10.14246/irspsd.7.2_92.
17. Petrović M., Mlinarić T., Semanjski I. Location Planning Approach for Intermodal Terminals in Urban and Suburban Rail Transport. *Promet – Traffic & Transportation*. 2019. Vol. 31, № 1. P. 101–111. DOI: <https://doi.org/10.7307/ptt.v31i1.3034>.
18. The Transport System and Transport Policy / Van Wee B., Annema J.A., Banister D. Eds. Cheltenham: Edward Elgar. 2013. 424 p.
19. Rahman M., Akther M.S., Recker W. The first-and-last-mile of public transportation: A study of access and egress travel characteristics of Dhaka's suburban commuters. *Journal of Public Transportation*. 2022. Vol. 24. 100025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpuptr.2022.100025>.
20. Кристопчук М.Є., Бичко З.В. До питання розміщення міських транспортно-пересадочних вузлів. *Комуніальне господарство міст*. 2012. № 103. С. 374–378.
21. Horbachov P., Svichynskyi S. Theoretical Substantiation of Trip Length Distribution for Home-Based Work Trips in Urban Transit Systems. *The Journal of Transport and Land Use*. 2018. Vol. 11, № 1. P. 593–632. DOI: <http://dx.doi.org/10.5198/jtlu.2018.916>.
22. Gupta S., Dhameniya S. Base Year Travel Demand Model – Delhi: Report. New Delhi: School of Planning and Architecture, 2016. 22 p.
23. Krizek K.J., McGuckin N. Shedding NHTS Light on the Use of ‘Little Vehicles’ in Urban Areas. *Transport Findings*. 2019. November. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.32866/10777>.
24. Кочина А.А. Формування пасажиропотоків у приміському сполученні на автомобільному транспорті : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01. Харків, 2020. 22 с.

References

1. Dulfan, S. (2014) Pro dotsilnist vlashtuvannia perekhopliuiuchykh parkovok u m. Kharkovi [About Expediency Device Intercepting Parking in Kharkiv City]. *Municipal Economy of Cities*, no. 116, pp. 89–92.
2. Dulfan, S. (2016). Zakonomirnosti vplyvu «perekhopliuiuchykh» parkovok na formuvannia transportnykh potokiv (na prykladi m. Kharkova) [Laws of influence of «ride» parking on the formation of traffic (for example, Kharkiv)]. [PhD dissertation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv]. Kharkiv. https://radats.kname.edu.ua/images/Files/aref_dulfan.pdf.
3. Dronova, O., & Boklah Ye. (2017). Vplyv transportnoi systemy Kyieva na zhyttia i mobilnist yoho zhyteliv [The Impact of the Kyiv Transport System on Citizens Life and Mobility]. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Georraphy*. Вип. 2(67). С. 94–100. <http://doi.org/10.17721/1728-2721.2017.66.14>.
4. Krepka, I.O., & Markovskiy A.I. (2022). Klasyfikatsiia pasazhyrskykh transportnykh khabiv [Classification of Passenger Transport Hubs]. *Theory and Practice of Design, Architecture and Construction*, no. 26, pp. 53–60. <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2022.26.7>.
5. U velykykh mistakh budut stvoriuvatysia transportno-peresadochni vuzly dlia zruchnoi ta shvydkoi peresadky pasazhyriv mizh riznymy vydamy transportu [In large cities, transport hubs will be established for convenient and quick passenger interchanges between different transport modes]. Article retrieved from Government Portal: <https://www.kmu.gov.ua/news/u-velikih-mistah-budut-stvoriuvatysya-transportno-peresadochni-vuzli-dlya-zruchnoyi-ta-shvydkoyi-peresadki-pasazhiriv-mizh-riznimi-vidami-transportu-lev-parchaladze>.
6. Ministry of Communities and Territories Development (2019). Planuvannia ta zabudova terytorii [Territory Planning and Development] (ДБН Б.2.2-12:2019). Minregion.

7. Vdovychenko, V. (2019). Rozvytok naukovo-tehnolohichnykh osnov vzaiemodii miskoho pasazhyrskoho transportu v transportno-peresadochnykh vuzlakh [Development of scientific and technological bases of interaction of urban passenger transport in transport hubs]. [DSc dissertation, Kharkiv National Automobile and Highway University]. Kharkiv. https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_Vchena_rada/VR_64_059_02/dis__Vdovychenko.pdf.
8. Krystopchuk, M., & Lobashov, O. (2012). Prymiski pasazhyrski perevezennia [Suburban Passenger Transportation]. Kharkiv: HTMT.
9. On Approval of the Procedure for Regulation of Bus Stations, Order of 27.09.2010 No. 700. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1068-10#Text>.
10. Zhuk, M., & Pivtorak H. (2019). Otsinka prytiakhuiuchoi zdatnosti vuzliv zovnishnoho transportu Lvova [The Evaluation the Flow Attracted by External Transport Hub in Lviv]. *Scientific Notes of Vernadsky Kyiv Polytechnic National University. Series: Technical sciences*, vol. 30(69), part 2, no 6, pp. 162–169. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.6-2/29>.
11. Zhuk M.M., Pivtorak H.V., Gits I.I., Kozak M.M. Prohnozuvannia vyboru vydu transportu u razi miskykh peremishchen na osnovi klasyfikatsiinykh derev rishen [Forecasting the Mode Choice of Transport for Urban Movements Using Classification Decision Trees]. *Scientific Notes of Vernadsky Kyiv Polytechnic National University. Series: Technical sciences*, vol. 31(70), no 4, pp. 221–226. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/32>.
12. Pivtorak, H., Holomovzyy, V., & Zhyla, M. (2020). Otsinka vplyvu zminy parametriv funktsii perevahy na rozpodil popytu na peremishchennia mizh transportnymi raionamy mista [Assessment of the influence of changes in the parameters of the utility function on the trip distribution between the transport zones of the city]. *Advances in Mechanical Engineering and Transport*, no. 2 (15), pp. 118–126. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i15.399>.
13. Pivtorak, G. (2021). Vyznachennia parametriv merezhi miskykh pasazhyrskykh perevezen na osnovi modelei teorii korisnosti z vypadkovym vyborom [Determination of parameters of urban passenger transportation network based on models of random utility theory]. [PhD dissertation, Lviv Polytechnic National University]. Lviv. <https://lpnu.ua/spetsrady/k-3505220/pivtorak-galyna-vasylivna>.
14. Strelko, O., Toropov, B., Hrushevskya, T., Voitsehovich, V., & Popovychuk, T. (2022). Doslidzhennia vplyvu pasazhyropotokiv na propusknu spromozhnist transportnykh peresadochnykh vuzliv [Research of the Influence of Passenger Flows on the Capacity of Transfer Nodes]. *Scientific Notes of Vernadsky Kyiv Polytechnic National University. Series: Technical sciences*, vol. 33 (72), no. 4. pp. 271–277. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/41>.
15. Khitrov, I., & Krystopchuk M. (2020). Zakonomirnosti formuvannia i rozpodilu transportnykh ta pasazhyrskykh potokiv [Regularities of Formation and Distribution of Transport and Passenger Flows]. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, no. 3(34), pp. 324–330. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).324-330](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).324-330).
16. Abdullah, A., Yudono, A., Adisasmita, S.A., & Akil A. (2019). Determination of Transit Service Accessibility Standard for Intercity Bus Passengers, *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*, vol. 7, issue 2, pp. 92–105. https://doi.org/10.14246/irspsd.7.2_92.
17. Petrović, M., Mlinarić, T., & Semanjski, I. (2019). Location Planning Approach for Intermodal Terminals in Urban and Suburban Rail Transport. *Promet – Traffic & Transportation*, vol. 31, no. 1. pp. 101–111. <https://doi.org/10.7307/ptt.v31i1.3034>.
18. Van Wee, B., Annema, J.A., & Banister, D. (Eds.). (2013). *The Transport System and Transport Policy*. Cheltenham: Edward Elgar.
19. Rahman, M., Akther, M.S., & Recker, W. (2022). The first-and-last-mile of public transportation: A study of access and egress travel characteristics of Dhaka’s suburban commuters. *Journal of Public Transportation*, vol. 24, 100025. <https://doi.org/10.1016/j.jpubtr.2022.100025>.
20. Krystopchuk, M., & Bychko, Z. (2012). Do pytannia rozmishchennia miskykh transportno-peresadochnykh vuzliv [On the Issue of Placement of Urban Transport and Interchange Hubs]. *Municipal Economy of Cities*, no. 103, pp. 374–378.
21. Horbachov, P., & Svichynskyi, S. (2018). Theoretical Substantiation of Trip Length Distribution for Home-Based Work Trips in Urban Transit Systems. *The Journal of Transport and Land Use*, vol. 11, no. 1, pp. 593–632. <http://dx.doi.org/10.5198/jtlu.2018.916>.
22. Gupta, S., & Dhameniya, S. (2016). *Base Year Travel Demand Model – Delhi* (Report). New Delhi: School of Planning and Architecture.
23. Krizek, K.J., & McGuckin, N. (2019). Shedding NHTS Light on the Use of ‘Little Vehicles’ in Urban Areas. *Transport Findings*, November, pp. 1–6. <https://doi.org/10.32866/10777>.
24. Kochina, A. (2020). Formuvannia pasazhyropotokiv u prymiskomu spoluchenni na avtomobilnomu transporti [Formation of Passenger Flows in Suburban Traffic by Road Transport]. [PhD dissertation, Kharkiv National Automobile and Highway University]. Kharkiv. https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_Vchena_rada/VR_64_059_02/aref_Kochina.pdf.