

УДК 711.7:656.13:656.11

DOI <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2026.40.22>

ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ТА РУХУ ПІШОХІДНИХ ПОТОКІВ У ЗОНІ ЗУПИНОК МАРШРУТНОГО ТРАНСПОРТУ

Степанчук Олександр Васильович¹, Тімкіна Світлана Юріївна²,
Чернишова Оксана Сергіївна³

¹ доктор технічних наук, професор,
професор кафедри комп'ютерних технологій будівництва,
Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна,
e-mail: oleksandr.stepanchuk@npp.kai.edu.ua, orcid: 0000-0002-2822-3471

² кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри інфраструктури авіаційного транспорту,
Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна,
e-mail: svitlana.timkina@npp.kai.edu.ua, orcid: 0000-0003-2418-2032

³ кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри інфраструктури авіаційного транспорту,
Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна,
e-mail: oksana.chernyshova@npp.kai.edu.ua, orcid: 0000-0002-8132-2153

Анотація. У статті проаналізовано особливості формування та руху пішохідних потоків у зоні впливу зупинок маршрутного транспорту. Досліджено фактори, що впливають на структуру та інтенсивність пішохідних переміщень у межах зупиночних територій, зокрема конфігурацію пішохідних зон, інтенсивність пасажиропотоків, організацію посадки та висадки пасажирів, а також наявність інфраструктурних елементів. Розглянуто характер взаємодії пішоходів, які підходять до транспорту, пасажирів, що виходять із транспортних засобів, та транзитних пішоходів. Встановлено закономірності виникнення локальних зон підвищеної щільності пішохідного руху та формування вузьких місць у межах зупиночних територій. Запропоновано модель пішохідного руху, яка дозволяє оцінювати інтенсивність пішохідних потоків, пропускну спроможність пішохідних зон і параметри зони накопичення пасажирів.

Метою даної роботи є дослідження особливостей формування та руху пішохідних потоків у зоні впливу зупинок маршрутного транспорту з урахуванням планувальних та транспортно-експлуатаційних факторів.

Методологія. Методологічною основою дослідження є положення теорії транспортних і пішохідних потоків, методи системного аналізу та математичного моделювання. У роботі використано аналітичні підходи для встановлення взаємозв'язку між основними параметрами пішохідного руху – інтенсивністю, щільністю та швидкістю пересування. Розглянуто структуру пішохідних потоків у зоні зупинки, що включає пасажирів, які підходять до транспорту, пасажирів, що виходять із транспортного засобу, та транзитних пішоходів. Для оцінювання взаємодії потоків запропоновано використання коефіцієнта конфліктності руху. Також застосовано методи визначення пропускну спроможності пішохідних зон та розрахунку необхідної ширини пішохідного простору.

Результати. У результаті дослідження встановлено, що у зоні зупинок маршрутного транспорту формуються складні структури пішохідних потоків, які

включають підхід пасажирів до транспорту, висадку пасажирів та транзитний рух уздовж тротуарів. Визначено основні фактори, що впливають на параметри пішохідного руху, серед яких конфігурація зупиночних майданчиків, ширина пішохідних зон, інтенсивність пасажиропотоків і наявність інфраструктурних елементів. Досліджено процес виникнення вузьких місць і зон скупчення пішоходів. Розроблена модель дозволяє визначати сумарну та ефективну інтенсивність пішохідного потоку, оцінювати пропускну спроможність пішохідних зон, визначати критичну кількість смуг пішохідного руху та розраховувати необхідну ширину пішохідного простору. Крім того, модель дозволяє оцінити площу зони накопичення пасажирів у межах посадкових майданчиків.

Наукова новизна дослідження полягає у розвитку підходів до моделювання пішохідного руху у зоні впливу зупинок маршрутного транспорту з урахуванням взаємодії трьох основних потоків – пасажирів, що підходять до транспорту, пасажирів, що виходять із транспортного засобу, та транзитних пішоходів. Удосконалено модель оцінювання параметрів пішохідного руху шляхом введення коефіцієнта конфліктності потоків, що дозволяє враховувати взаємні перешкоди між потоками та їхній вплив на пропускну спроможність пішохідних зон. Запропоновано підхід до визначення критичної кількості смуг пішохідного руху та необхідної ширини пішохідних зон з урахуванням параметрів комфортності пересування.

Практична значущість. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованої моделі для обґрунтування інженерно-планувальних рішень під час проєктування та реконструкції зупинок маршрутного транспорту і прилеглих пішохідних територій. Запропонований підхід дозволяє прогнозувати інтенсивність пішохідних потоків, визначати оптимальні параметри пішохідних зон і оцінювати пропускну спроможність пішохідної інфраструктури. Використання результатів дослідження сприятиме підвищенню ефективності функціонування міської транспортної системи, забезпеченню безпеки руху та створенню комфортних умов пересування пасажирів.

Ключові слова: пішохідний потік, зупинка маршрутного транспорту, пасажиропотік, пропускну спроможність, пішохідна інфраструктура, інтенсивність руху, щільність пішохідного потоку, ширина пішохідної зони, міська транспортна система.

ВСТУП

Сучасний розвиток міст характеризується постійним зростанням мобільності населення та інтенсивності переміщень у системі міської транспортної інфраструктури. Урбанізаційні процеси, збільшення чисельності населення та розширення функціональної структури міського середовища зумовлюють підвищення попиту на транспортні послуги та активізацію пішохідних переміщень. У цих умовах особливого значення набуває ефективна організація взаємодії різних видів руху, зокрема у місцях концентрації пасажиропотоків. Одними з найбільш характерних таких місць є зони розміщення зупинок маршрутного транспорту, де відбувається інтенсивна взаємодія транспортних та пішохідних потоків. Саме у цих зонах формуються складні просторово-динамічні процеси руху пішоходів, що безпосередньо впливають на рівень безпеки, пропускну спроможність

та комфортність використання міського простору.

Зона впливу зупинки маршрутного транспорту характеризується підвищеною концентрацією пішоходів, які здійснюють посадку, висадку або транзитне переміщення. Формування пішохідних потоків у таких місцях відбувається під впливом багатьох факторів, зокрема інтенсивності пасажиропотоку, планувальної структури території, ширини тротуарів та організації простору очікування. Додатковий вплив мають розташування пішохідних переходів, наявність малих архітектурних форм, торговельних об'єктів та інших елементів міського середовища. У результаті взаємодії зазначених чинників виникають локальні підвищення щільності пішохідних потоків, що можуть призводити до зниження пропускну спроможності пішохідних зон. Це, у свою чергу, впливає на рівень комфорту та безпеки пересування пішоходів у межах зупиночних територій.

Важливою особливістю пішохідного руху в зоні зупинок є його нерівномірність у часі та просторі, що зумовлена графіком руху транспортних засобів і характером посадки та висадки пасажирів. У моменти прибуття маршрутного транспорту спостерігається різке збільшення щільності пішохідних потоків, що призводить до тимчасових перевантажень функціональних зон. Такі процеси потребують детального аналізу з позицій теорії транспортних і пішохідних потоків. Наукові дослідження у цій сфері спрямовані на виявлення закономірностей формування потоків та визначення параметрів, що впливають на їхню динаміку. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення планувальних рішень зупиночних комплексів та прилеглих пішохідних територій.

Разом з тим, існуючі підходи до організації пішохідного руху не завжди враховують специфіку функціонування зон зупинок маршрутного транспорту. Недостатня увага до особливостей формування пішохідних потоків у цих місцях може призводити до виникнення конфліктних ситуацій між пішоходами та транспортом, а також до погіршення умов пересування. Тому, дослідження закономірностей руху пішоходів у зоні впливу зупинок є важливим завданням сучасної теорії містобудування. Особливу увагу необхідно приділяти аналізу просторової організації потоків та визначенню ключових факторів, що формують їхню структуру. Результати таких досліджень сприятимуть підвищенню ефективності використання міського простору та забезпеченню безпечного й комфортного пересування пішоходів.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження закономірностей формування та руху пішохідних потоків є важливим напрямом сучасної транспортної та містобудівної науки. Значна кількість наукових робіт присвячена вивченню параметрів пішохідного руху, зокрема інтенсивності, швидкості та щільності потоків, що дозволяє оцінювати ефективність функціонування пішохідної інфраструктури. Дослідження пішохідних переміщень у міському середовищі показують, що просторові характеристики вуличної мережі та конфігурація транспортної інфраструктури суттєво впливають на розподіл і напрямки руху пішоходів [13]. Встановлено, що структура міського середовища визначає закономірності формування пішохідних маршрутів та інтенсивність переміщень між основними об'єктами тяжіння населення.

Окремий напрям наукових досліджень присвячений аналізу пішохідних потоків

у транспортних вузлах та місцях концентрації пасажиропотоків. У наукових працях розглядаються моделі формування пішохідних потоків у транспортних вузлах, які дозволяють досліджувати поведінку пішоходів та прогнозувати зміну параметрів руху залежно від умов функціонування транспортної інфраструктури [11]. Експериментальні дослідження також підтверджують, що на ділянках з обмеженою шириною проходів або наявністю перешкод відбувається підвищення щільності пішохідного потоку та зниження швидкості руху [12]. Крім того, встановлено, що взаємодія пішохідних і транспортних потоків може суттєво впливати на поведінку пішоходів у зоні розміщення зупинок маршрутного транспорту та змінювати структуру їхніх переміщень [10].

Важливим питанням дослідження пішохідних потоків є також оцінювання доступності зупинок маршрутного транспорту та визначення параметрів формування пасажирських потоків. У сучасних дослідженнях для цього активно застосовуються геоінформаційні технології, що дозволяють визначати радіуси пішохідної доступності та аналізувати просторову структуру переміщень користувачів транспортної системи [14]. Встановлено, що розміщення об'єктів землекористування та функціональна структура території безпосередньо впливають на обсяги пасажирських потоків у зоні зупинок маршрутного транспорту [16].

У вітчизняних наукових роботах значна увага приділяється питанням організації пішохідних просторів та інженерно-планувальних рішень об'єктів транспортної інфраструктури. Дослідження показують, що параметри пішохідних потоків є важливим фактором формування планувальних рішень зупинок маршрутного транспорту та прилеглих територій [3; 5; 6]. Встановлено, що конфігурація зупиночного простору, розташування пішохідних переходів і посадкових майданчиків суттєво впливають на структуру пішохідного руху та рівень пропускнуєї спроможності таких об'єктів [3]. Водночас результати досліджень підтверджують необхідність урахування параметрів пішохідного руху під час визначення ширини функціональних зон транспортних об'єктів, зокрема у межах аеровокзальних комплексів та інших великих транспортних споруд [2].

Окремі наукові праці присвячені дослідженню безпеки та доступності пішохідного середовища, а також адаптації транспортної інфраструктури до потреб різних груп населення [8; 9]. У цих роботах підкреслюється

необхідність урахування принципів забезпечення безпечних умов пересування у громадських просторах. Разом з тим, у сучасних дослідженнях розглядаються питання оптимізації пропускної спроможності зупинок маршрутного транспорту та зменшення кількості конфліктних ситуацій між пішоходами і транспортними потоками [4].

Незважаючи на значну кількість наукових праць, присвячених дослідженню пішохідних і пасажирських потоків, питання формування та руху пішохідних потоків безпосередньо у зоні впливу зупинок маршрутного транспорту залишаються недостатньо дослідженими. Більшість існуючих робіт зосереджена на аналізі загальних характеристик пішохідного руху або функціонуванні транспортних вузлів у цілому, тоді як просторово-динамічні особливості руху пішоходів у межах зупиночних територій потребують подальшого наукового дослідження.

МЕТА

Метою даної роботи є визначення закономірностей формування та руху пішохідних потоків у зоні впливу зупинок маршрутного транспорту та розроблення моделі, що дозволяє оцінювати параметри пішохідного руху з урахуванням інтенсивності пасажиропотоків, планувальних характеристик зупиночних майданчиків і особливостей організації руху пішоходів.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Поведінка пішоходів у зоні зупинок маршрутного транспорту є важливим фактором, що визначає ефективність функціонування міської транспортної інфраструктури. Особливості переміщення людей у таких зонах формуються під впливом просторових, функціональних та поведінкових чинників. До основних факторів належать конфігурація зупиночних майданчиків, інтенсивність транспортних потоків, щільність пішохідного руху та організація прилеглих пішохідних зон. Дослідження показують, що різні типи зупинок характеризуються відмінними моделями формування та руху пішохідних потоків. У зв'язку з цим виявлення особливостей поведінки пішоходів на різних типах зупинок є важливим етапом удосконалення їх планувальної організації.

Зупинки маршрутного транспорту можуть розміщуватися у різних містобудівних умовах, зокрема на магістральних вулицях, у вузлах транспортних пересадок, біля великих громадських будівель та комплексів або в межах житлових районів. Кожен із цих типів

зупинок характеризується специфічними умовами взаємодії пішоходів із транспортними потоками. Наприклад, на зупинках, розташованих уздовж магістральних вулиць, спостерігається підвищена інтенсивність переміщення пасажирів, що прямують до пішохідних переходів. У таких умовах формуються переважно лінійні траєкторії руху, спрямовані від зупинки до переходу або навпаки. Водночас у транспортно-пересадочних вузлах характерною є багатонаправлена структура потоків. Це пояснюється одночасним прибуттям і відправленням пасажирів різних видів транспорту.

Особливості поведінки пішоходів також залежать від типу організації посадкових майданчиків. На зупинках із вузькими посадковими зонами пішоходи змушені формувати щільні групи очікування, що впливає на швидкість їх подальшого переміщення. У таких умовах часто виникають локальні скупчення людей, які можуть знижувати пропускну спроможність пішохідних зон. На зупинках із просторими майданчиками спостерігається більш рівномірний розподіл пасажирів у зоні очікування. Це сприяє формуванню впорядкованих траєкторій руху під час посадки та висадки пасажирів. Водночас поведінка пішоходів у таких умовах характеризується більшою варіативністю маршрутів переміщення.

Важливу роль у формуванні поведінкових моделей відіграє наявність перешкод у пішохідному просторі. До таких елементів належать опори освітлення, інформаційні стенди, кіоски або елементи благоустрою. Наявність подібних об'єктів може змінювати траєкторії руху пішоходів та спричиняти нерівномірний розподіл потоків. У результаті формуються ділянки підвищеної щільності руху, що впливають на загальну ефективність функціонування зупинки. Дослідження показують, що пішоходи зазвичай намагаються обирати найкоротший та найменш завантажений маршрут пересування. Це свідчить про адаптивний характер їх поведінки в умовах змінної щільності потоків.

Таким чином, аналіз поведінки пішоходів на різних типах зупинок дозволяє виявити закономірності формування пішохідних потоків у міському середовищі. Встановлено, що просторові параметри зупинок, інтенсивність руху та наявність інфраструктурних елементів суттєво впливають на характер переміщення пішоходів. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення планувальних рішень зупиночних майданчиків. Зокрема, оптимізація ширини пішохідних зон і раціональне розміщення елементів інфраструктури сприяє підвищенню пропускної спроможності

та безпеки руху. Врахування поведінкових особливостей пішоходів є важливим фактором при проектуванні сучасних зупинок маршрутного транспорту. Це дозволяє створювати комфортні та функціонально ефективні умови для пересування пасажирів у межах міської транспортної системи.

Зона впливу зупинки маршрутного транспорту характеризується підвищеною концентрацією пішохідних потоків, що пов'язано з процесами посадки, висадки пасажирів та перерозподілом напрямків руху. У таких умовах формуються ділянки простору, де щільність пішохідного руху зростає і виникають так звані вузькі місця. Аналіз цих зон є важливим елементом дослідження ефективності функціонування пішохідної інфраструктури. Вузькі місця можуть виникати як унаслідок обмежених просторових параметрів пішохідних зон, так і в результаті нераціонального розміщення елементів інфраструктури. У межах зупиночних територій такі ділянки часто формуються на підходах до посадкових майданчиків, у місцях перетину потоків та біля пішохідних переходів.

Однією з основних причин виникнення вузьких місць є недостатня ширина тротуарів або проходів у зоні очікування пасажирів. У періоди підвищеної інтенсивності руху пішоходи змушені концентруватися у обмеженому просторі, що призводить до зростання щільності потоків. У таких умовах швидкість переміщення людей знижується, а траєкторії руху стають менш впорядкованими. Додатково вплив на формування вузьких місць можуть мати елементи благоустрою, зокрема павільйони зупинок, торговельні кіоски або інформаційні конструкції. Розташування цих елементів у безпосередній близькості до основних напрямків руху може частково перекривати пішохідний простір. У результаті пішохідні потоки змушені змінювати свої траєкторії, що спричиняє локальне збільшення щільності руху.

Іншою характерною зоною утворення скупчень є місця перетину різноспрямованих пішохідних потоків. Подібна ситуація спостерігається, коли пасажирів, що виходять із транспортного засобу, перетинаються з пішоходами, які прямують до зупинки. Такі взаємодії призводять до виникнення короткочасних затримок і зміни швидкості руху. У періоди пікового навантаження це може спричинити формування стійких зон підвищеної щільності. Особливо вираженими ці процеси є на зупинках, що розташовані поблизу великих транспортних вузлів або пересадочних пунктів. У таких умовах одночасний

рух значної кількості пасажирів у різних напрямках створює складну структуру потоків.

Важливим фактором, що впливає на формування зон скупчення, є організація посадки та висадки пасажирів. Якщо посадкові майданчики мають обмежену площу, пасажирів змушені концентруватися безпосередньо біля місця зупинки транспортного засобу [7]. У результаті виникає локальне перевантаження пішохідного простору. Крім того, наявність черг на посадку може додатково ускладнювати рух інших пішоходів. У таких умовах траєкторії руху стають більш хаотичними, що знижує пропускну спроможність зони.

Дослідження показують, що пішоходи прагнуть обходити ділянки з підвищеною щільністю руху, обираючи альтернативні маршрути пересування. Однак у зоні впливу зупинок такі можливості часто обмежені просторовою конфігурацією території. Це призводить до того, що пішоходи змушені рухатися через перевантажені ділянки. У результаті виникає ефект накопичення людей, який може поширюватися на прилеглі пішохідні зони.

Таким чином, аналіз вузьких місць та зон скупчення пішоходів у зоні впливу зупинки маршрутного транспорту дозволяє виявити ключові проблеми організації пішохідного руху. Основними причинами їх виникнення є обмежені просторові параметри, перетин різноспрямованих потоків та нераціональне розміщення інфраструктурних елементів. Виявлення таких ділянок дає змогу обґрунтувати заходи з удосконалення планувальної організації зупинок. Оптимізація ширини пішохідних зон, впорядкування зон очікування та раціональне розміщення елементів благоустрою сприятимуть зменшенню щільності потоків. Реалізація таких заходів дозволить підвищити ефективність функціонування зупиночних територій і забезпечити більш комфортні умови для пересування пішоходів.

Визначення оптимальної ширини пішохідних зон у районі зупинок маршрутного транспорту є важливим завданням при плануванні міської транспортної інфраструктури. Ширина пішохідного простору безпосередньо впливає на пропускну спроможність, комфорт і безпеку пересування людей.

Пропускної спроможності пішохідних зон у районі зупинок маршрутного транспорту є важливим етапом дослідження ефективності організації руху в міському середовищі. Пропускна спроможність визначає максимально можливу кількість пішоходів, які можуть пройти через певну ділянку простору за одиницю часу без суттєвого зниження швидкості руху та рівня комфорту. Розрахункові

значення пропускної спроможності, як правило, базуються на нормативних показниках щільності потоків, середній швидкості пересування та геометричних параметрах пішохідної інфраструктури.

У межах зон зупинок маршрутного транспорту пішохідні потоки характеризуються підвищеною інтенсивністю, що пов'язано з процесами посадки, висадки та очікування пасажирів [7]. У таких умовах недостатня ширина тротуарів і підходів до зупинок може призводити до утворення локальних скупчень пішоходів. Це, у свою чергу, негативно впливає на швидкість пересування та ефективність функціонування пішохідної інфраструктури.

Оптимальна ширина пішохідних зон повинна визначатися з урахуванням інтенсивності пішохідних потоків, структури переміщень та особливостей просторової організації зупиночної території. При цьому необхідно враховувати як транзитний рух пішоходів, так і процеси очікування транспорту. У зоні зупинок частина пішоходів переміщується вздовж тротуарів, тоді як інші залишаються у зоні посадкових майданчиків. Така особливість формує складну структуру потоків, що потребує достатнього просторового резерву для їх розміщення. Відсутність такого резерву може призводити до змішування потоків і виникнення взаємних перешкод.

Визначення оптимальної ширини пішохідних зон також пов'язане з оцінкою пропускної спроможності пішохідної інфраструктури. Зі збільшенням інтенсивності руху щільність пішохідних потоків зростає, що призводить до зниження середньої швидкості пересування. Якщо ширина тротуару або посадкового майданчика є недостатньою, пішоходи змушені змінювати траєкторії руху та обходити один одного. У результаті траєкторії стають менш впорядкованими, а ефективність використання простору знижується. Оптимальна ширина пішохідної зони повинна забезпечувати можливість вільного руху людей без значного зниження швидкості пересування.

Важливим підходом є також врахування поведінкових особливостей пішоходів. Дослідження показують, що люди прагнуть зберігати певну індивідуальну дистанцію під час руху. У разі недостатньої ширини пішохідного простору ця дистанція зменшується, що може викликати дискомфорт та уповільнення руху. Крім того, у зоні зупинок часто формуються групи пасажирів, які очікують транспорт або супроводжують інших осіб. Подібні групи займають додатковий простір і впливають на структуру пішохідних потоків. Тому

при визначенні ширини пішохідних зон необхідно враховувати не лише інтенсивність руху, а й характер поведінки людей у таких місцях.

Окрему увагу слід приділяти впливу інфраструктурних елементів на ефективну ширину пішохідних зон. Павільйони зупинок, інформаційні стенди, опори освітлення та інші об'єкти благоустрою можуть частково займати пішохідний простір. У результаті фактична ширина проходу зменшується, що впливає на пропускну спроможність тротуарів. Якщо такі елементи розміщені без урахування основних напрямків руху пішоходів, вони можуть створювати додаткові перешкоди. Це призводить до формування локальних зон підвищеної щільності та зниження ефективності використання простору.

Визначення оптимальної ширини пішохідних зон повинно також враховувати перспективи зростання інтенсивності руху у майбутньому. Розвиток міської транспортної системи, збільшення пасажиропотоку та зміни у структурі мобільності населення можуть призводити до зростання навантаження на пішохідну інфраструктуру. У зв'язку з цим доцільним є створення певного резерву пропускної спроможності пішохідних зон. Це дозволить забезпечити стабільне функціонування інфраструктури навіть за умов підвищеної інтенсивності руху.

Таким чином, визначення оптимальної ширини пішохідних зон у районі зупинок маршрутного транспорту є комплексним завданням, що потребує врахування інтенсивності потоків, поведінкових особливостей пішоходів та просторової організації інфраструктури. Раціональне планування ширини тротуарів і посадкових майданчиків сприяє підвищенню пропускної спроможності та зменшенню кількості конфліктних ситуацій [4]. Крім того, достатня ширина пішохідних зон забезпечує комфортні умови для пересування людей. Урахування цих факторів дозволяє формувати ефективне та безпечне пішохідне середовище у зоні впливу зупинок маршрутного транспорту.

Функціонування зупинки маршрутного транспорту можна розглядати як відкриту динамічну систему, у якій відбувається надходження, накопичення та вибуття пасажирів. Основними елементами цієї системи є підходи до зупинки, зона очікування, посадковий майданчик та пішохідні переходи [15].

Розглянемо математичну модель пішохідного руху в зоні зупинки маршрутного транспорту. Для оцінювання параметрів пішохідного руху в зоні впливу зупинки маршрутного

транспорту використовується модель, що ґрунтується на взаємозв'язку між інтенсивністю потоку, щільністю та швидкістю руху пішоходів.

У зоні зупинки маршрутного транспорту формуються три основні пішохідні потоки (рис. 1):

- потік пасажирів, що підходять до зупинки (для посадки);
- потік пасажирів, що виходять із транспортного засобу;
- транзитний пішохідний потік, що проходить уздовж тротуару.

Інтенсивність підходу пасажирів до зупинки. Інтенсивність підходу пасажирів до зупинки характеризує попит на перевезення та визначається як середня кількість пасажирів, що прибувають до зупинки за одиницю часу:

$$\lambda_{in} = \frac{dP}{dt}$$

Кількість пасажирів, що накопичуються на платформі між двома транспортними засобами, визначається:

$$P_{in} = \lambda_{in} \times T,$$

де λ_{in} – інтенсивність підходу пасажирів до зупинки, осіб/с;

P_{in} – кількість пасажирів, що підходять до зупинки протягом інтервалу руху транспорту, осіб;

T – інтервал руху транспортних засобів, с.

Інтенсивність висадки пасажирів

$$\lambda_{out} = \frac{P_{out}}{t_{out}},$$

де λ_{out} – інтенсивність висадки пасажирів із транспортного засобу, осіб/с;

P_{out} – кількість пасажирів, що виходять на зупинці, осіб;

t_{out} – тривалість висадки усіх пасажирів, с.

Тоді, загальний час висадки пасажирів можна визначити за формулою:

$$t_{out} = \frac{P_{out} \times t_d}{m},$$

де t_d – середній час висадки одного пасажирів, с;

m – кількість дверей, од.

Сумарна інтенсивність пішохідного потоку

$$N_{tot} = N_{tr} + \lambda_{out} + \lambda_{in},$$

де N_{tot} – сумарна інтенсивність пішохідного потоку у зоні зупинки, осіб/с;
 N_{tr} – інтенсивність транзитного пішохідного потоку уздовж тротуару, осіб/с.

Урахування конфліктності пішохідних потоків.

У зоні зупинки виникає взаємодія потоків:

- пасажирів, що підходять до транспорту,
- пасажирів, що виходять із транспорту,
- транзитні пішоходи.

Це призводить до зниження ефективної пропускної спроможності пішохідної зони. Для врахування цього явища вводиться коефіцієнт конфліктності потоків.

$$N_{ef} = k_c \times N_{tot},$$

де N_{ef} – приведена (ефективна) інтенсивність пішохідного потоку, осіб/с;

k_c – коефіцієнт конфліктності потоків.

Основною характеристикою пішохідного потоку є інтенсивність руху, яка визначається як кількість пішоходів, що проходять через певний переріз пішохідної зони за одиницю часу:

$$n = q \times v,$$

де n – інтенсивність потоку на 1 смугу руху пішохідної зони, осіб/(м с);

q – щільність пішохідного потоку, осіб/м²;

v – середня швидкість руху пішоходів, м/с

Ця залежність є базовою для аналізу транспортних потоків і дозволяє оцінювати пропускну спроможність пішохідних зон.

Відомо, що швидкість руху пішоходів залежить від щільності потоку. При зростанні



Рис. 1. Структура людських потоків у зоні зупинки маршрутного транспорту (розроблено автором)

щільності швидкість поступово зменшується. Ця залежність може бути описана лінійною моделлю:

$$v = v_0 \left(1 - \frac{q}{q_{max}} \right),$$

де v_0 – швидкість вільного руху пішоходів (1,2–1,4 м/с);

q_{max} – максимальна щільність пішохідного потоку (3–5 осіб/м²).

Підставивши це рівняння у базову формулу інтенсивності, отримуємо модель інтенсивності пішохідного потоку:

$$n = qv_0 \left(1 - \frac{q}{q_{max}} \right)$$

Ця функція дозволяє визначити критичну щільність, при якій досягається максимальна пропускна спроможність пішохідної зони.

Максимальна інтенсивність пішохідного потоку визначається за формулою:

$$n_{max} = \frac{v_0 \times q_{max}}{4}$$

Отримане значення характеризує граничну пропускну спроможність пішохідної зони.

Допустима інтенсивність

$$n_{доп} = k_{conf} \times n_{max}$$

де k_{conf} – коефіцієнт комфортності руху.

Пропускна спроможність пішохідної зони

Пропускна спроможність зони визначається:

$$N_{cap} = n_{доп} \times b,$$

де N_{cap} – пропускна спроможність пішохідної ділянки, осіб/с;

b – ширина пішохідної зони, м.

Для забезпечення нормального руху необхідно, щоб

$$N_{ef} \leq N_{cap}$$

Необхідна кількість смуг пішохідного руху визначається:

$$k_{кр} = \frac{N_{ef}}{n_{доп}},$$

де $k_{кр}$ – критична кількість смуг пішохідного руху.

Отримане значення округлюється до більшого цілого.

Визначення ширини

Ширина пішохідної зони визначається через нормативну ширину смуги руху за формулою:

$$b = k_{кр} \times b_s,$$

де b – необхідна ширина пішохідної зони, м;
 b_s – нормативна ширина однієї смуги пішохідного руху, м.

Модель накопичення пішоходів у зоні зупинки.

У зоні посадкового майданчика може виникати накопичення пасажирів, що описується балансом потоків:

$$\frac{dP_{zo}}{dt} = \lambda_{in} - \mu,$$

де P_{zo} – кількість людей у зоні очікування, осіб;

μ – інтенсивність посадки людей у транспортний засіб, осіб/с.

Можна визначити площу зони накопичення людей біля зупинки маршрутного транспорту. Площа платформи визначається з урахуванням допустимої щільності:

$$S_p = \frac{P_{zo}}{q_{доп}},$$

де S_p – необхідна площа платформи, м²;

$q_{доп}$ – допустима щільність пасажирів (2,0 осіб/м²) [1].

Розроблена математична модель призначена для опису закономірностей формування та функціонування пішохідних потоків у зоні зупинки маршрутного транспорту з урахуванням взаємодії між параметрами руху пішоходів і режимом роботи транспортних засобів. Що дозволяє комплексно оцінити поведінку пішоходів та просторові параметри зупинкових майданчиків. Використання даного підходу на практиці дозволяє оцінити вплив різних параметрів транспортної системи, зокрема інтервалів руху транспортних засобів, середньої кількості пасажирів на транспорт, структури посадкових майданчиків та транзитних потоків, на необхідну ширину пішохідних зон.

Запропонована модель забезпечує цілісне уявлення про поведінку пішоходів у зоні зупинок маршрутного транспорту, дозволяє прогнозувати інтенсивність потоків, визначити критичні параметри ширини пішохідних зон та площі майданчику на зупинці. Вона може бути використана як інструмент для прийняття обґрунтованих рішень щодо планування та оптимізації пішохідної інфраструктури з метою підвищення пропускної спроможності, безпеки та комфорту пасажирів.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження показало, що пішохідний рух у зоні зупинок маршрутного транспорту характеризується високою динамічністю, нерівномірністю та локальними зонами підвищеної щільності. Основними чинниками, що впливають на формування пішохідних потоків, є просторові параметри зупиночного майданчика, інтенсивність транспортних потоків, організація посадки та висадки пасажирів, а також наявність інфраструктурних елементів.

Досліджено характер виникнення вузьких місць та зон скупчень, основними причинами яких є обмежені просторові параметри пішохідних зон, перетин різноспрямованих потоків та нераціональне розміщення елементів благоустрою. Виявлення таких ділянок дозволяє обґрунтувати заходи щодо оптимізації планування зупинок та прилеглих територій.

Запропонована математична модель пішохідного руху дозволяє комплексно оцінити інтенсивність потоків, щільність та швидкість пересування пішоходів, враховуючи взаємодію пасажирів, що підходять, виходять та рухаються транзитом. Модель забезпечує визначення критичних параметрів пропускної спроможності, необхідної ширини пішохідних зон і площі посадкових майданчиків.

Отримані результати можуть бути використані як інструмент для прийняття обґрунтованих рішень при плануванні та оптимізації пішохідної інфраструктури в міських транспортних системах, що сприятиме підвищенню пропускної спроможності, безпеки та комфорту пасажирів.

ЛІТЕРАТУРА

[1] ДБН В.2.3-5:2018. Вулиці та дороги населених пунктів : ДБН України. Київ : Мінрегіон України, 2018. 55 с.

[2] Пустовойт Р. О., Степанчук О. В. Визначення оптимальної ширини пішохідної зони на території аеро вокзалних комплексів. *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal*. 2024. № 1(3). С. 40–46. DOI: <https://doi.org/10.32782/apcmj.2024.3.6>

[3] Пустовойт Р. О., Тімкіна С. Ю., Степанчук О. В. Інженерно-планувальні рішення зупинок маршрутного транспорту на прикладі Києва. *Теорія та практика дизайну*. 2022. Вип. 26. С. 87–96. DOI: <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2022.26.11>

[4] Степанчук О. В., Тімкіна С. Ю. Оптимізація пропускної спроможності зупинок маршрутного транспорту з урахуванням часу виникнення конфліктів. *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal*. 2025. № 2. С. 196–205. DOI: <https://doi.org/10.32782/apcmj.2025.2.21>

[5] Степанчук О. В., Тімкіна С. Ю., Чернишова О. С. Вплив пішохідних і пасажирських потоків на інженерно-планувальне рішення зупинок маршрутного транспорту. *Теорія та практика дизайну. Архітектура та будівництво*. Київ : KAI, 2025. Вип. 1(35). С. 65–74. DOI: <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2025.35.7>

[6] Степанчук О. В., Чернишова О. С., Омельяненко М. В. Особливості та закономірності пішохідного руху на міських вулицях. *Теорія та практика дизайну. Архітектура та будівництво*. Київ : НАУ, 2024. Вип. 3(33). С. 95–104. DOI: <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2024.33.10>

[7] Тімкіна С. Ю. Інженерно-планувальна організація зупинок маршрутного транспорту на

магістральних вулицях крупних міст : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.20. Київ, 2024. 182 с.

[8] Чернишова О. С., Степанчук О. В. Оцінка рівня безпеки пішохідних потоків у громадських просторах. *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal*. 2025. № 2. С. 215–222. DOI: <https://doi.org/10.32782/apcmj.2025.2.23>

[9] Чернишова О. С., Степанчук О. В., Дубик О. М. Сучасні вимоги до пішохідних зон аеропортів та залізничних вокзалів з урахуванням потреб маломобільних груп населення. *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal*. 2024. № 2(4). С. 141–149. DOI: <https://doi.org/10.32782/apcmj.2024.4.14>

[10] Ancaies P.R., Jones P. The influence of motorised traffic on pedestrian flows: new insights using bus stop data. University College London, 2015. 36 p. URL: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1543277> (accessed: 12.03.2026).

[11] Jia X. et al. Inferring the structure of pedestrian flows at a transportation hub. *Accident Analysis & Prevention*. 2026. Vol. 228. Article 108391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2025.108391>

[12] Luo W. et al. Experimental study for optimizing pedestrian flows at bottlenecks of subway stations. *Promet-Traffic & Transportation*. 2018. Vol. 30, No. 5. P. 525–538. DOI: <https://doi.org/10.7307/ptt.v30i5.2715>

[13] Sevtsuk A. Estimating pedestrian flows on street networks: revisiting the betweenness index. *Journal of the American Planning Association*. 2021. Vol. 87, No. 4. P. 512–526. DOI: <https://doi.org/10.1080/01944363.2020.1864758>

[14] Talpur M. A. H. et al. Measuring GIS based pedestrian accessibility to bus stops: a sustainable approach to ease urban traffic problems at Hyderabad, Pakistan. *Discover Cities*. 2024. Vol. 1, Article 28. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44327-024-00031-5>

[15] Timkina S., Stepanchuk O. V., Bieliatynskyi A. A. The design of the length of the route transport stops' landing pad on streets of the city. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. № 708. 012032.

[16] Zhang J. et al. An estimation method for passenger flow volumes from and to bus stops based on land use elements: an experimental study. *Land*. 2024. Vol. 13, No. 7. Article 971. DOI: <https://doi.org/10.3390/land13070971>

REFERENCES

[1] Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine. (2018). *Vulytsi ta dorohy naselenykh punktiv (DBN V.2.3-5:2018)* [Streets and roads of settlements]. [in Ukrainian].

[2] Pustovoyt, R. O., & Stepanchuk, O. V. (2024). Vyznachennia optymalnoi shyryny pishokhidnoi zony na terytorii aerovokzalnykh kompleksiv [Determination of the optimal width of the pedestrian zone on the territory of airport complexes]. *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal*, (1(3)), 40–46. <https://doi.org/10.32782/apcmj.2024.3.6> [in Ukrainian].

[3] Pustovoyt, R. O., Timkina, S. Yu., & Stepanchuk, O. V. (2022). Inzhenerno-planuvalni

rishennia zupynok marshrutnoho transportu na prykladi Kyieva [Engineering and planning solutions for public transport stops on the example of Kyiv]. *Teoriia ta praktyka dyzainu*, (26), 87–96. <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2022.26.11> [in Ukrainian].

[4] Stepanchuk, O. V., & Timkina, S. Yu. (2025). Optyimizatsiia propusknoi spromozhnosti zupynok marshrutnoho transportu z urakhuvanniam chasu vynyknennia konfliktiv [Optimization of the capacity of public transport stops considering conflict occurrence time]. *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal*, (2), 196–205. <https://doi.org/10.32782/apcmj.2025.2.21> [in Ukrainian].

[5] Stepanchuk, O. V., Timkina, S. Yu., & Chernyshova, O. S. (2025). Vplyv pishokhidnykh i pasazhyrskykh potokiv nainzhenerno-planuvalnirishennia zupynok marshrutnoho transportu [Influence of pedestrian and passenger flows on the planning solution of public transport stops]. *Arkhitektura ta budivnytstvo*, (1(35)), 65–74. <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2025.35.7> [in Ukrainian].

[6] Stepanchuk, O. V., Chernyshova, O. S., & Omelianenko, M. V. (2024). Osoblyvosti ta zakonomirnosti pishokhidnoho rukhu na miskykh vulytsiakh [Features and regularities of pedestrian movement on urban streets]. *Teoriia ta praktyka dyzainu. Arkhitektura ta budivnytstvo*, (3(33)), 95–104. <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2024.33.10> [in Ukrainian].

[7] Timkina, S. Yu. (2024). *Inzhenerno-planuvalna orhanizatsiia zupynok marshrutnoho transportu na mahistralnykh vulytsiakh krupnykh mist* [Engineering and planning organization of public transport stops on arterial streets of large cities] (PhD dissertation). Kyiv. [in Ukrainian].

[8] Chernyshova, O. S., & Stepanchuk, O. V. (2025). Otsinka rivnia bezpeky pishokhidnykh potokiv u hromadskykh prostorakh [Assessment of pedestrian flow safety in public spaces]. *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal*, (2), 215–222. <https://doi.org/10.32782/apcmj.2025.2.23> [in Ukrainian].

[9] Chernyshova, O. S., Stepanchuk, O. V., & Dubyk, O. M. (2024). Suchasni vymohy do pishokhidnykh

zon aeroportiv ta zaliznychnykh vokzaliv z urakhuvanniam potreb malomobilnykh hrup naselennia [Modern requirements for pedestrian zones of airports and railway stations considering the needs of people with reduced mobility]. *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal*, (2(4)), 141–149. <https://doi.org/10.32782/apcmj.2024.4.14> [in Ukrainian].

[10] Ancaes, P. R., & Jones, P. (2015). *The influence of motorised traffic on pedestrian flows: New insights using bus stop data*. University College London. <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1543277>

[11] Jia, X., Feliciani, C., Murakami, H., Tanida, S., Chen, L., Yue, H., Yanagisawa, D., & Nishinari, K. (2026). Inferring the structure of pedestrian flows at a transportation hub. *Accident Analysis & Prevention*, 228, 108391. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2025.108391>

[12] Luo, W., Sun, L., Yao, L., Gong, Q., & Rong, J. (2018). Experimental study for optimizing pedestrian flows at bottlenecks of subway stations. *Promet – Traffic & Transportation*, 30(5), 525–538. <https://doi.org/10.7307/ptt.v30i5.2715>

[13] Sevtsuk, A. (2021). Estimating pedestrian flows on street networks: Revisiting the betweenness index. *Journal of the American Planning Association*, 87(4), 512–526. <https://doi.org/10.1080/01944363.2020.1864758>

[14] Talpur, M. A. H., Khahro, S. H., Abro, S., & Shaikh, H. (2024). Measuring GIS-based pedestrian accessibility to bus stops: A sustainable approach to ease urban traffic problems at Hyderabad, Pakistan. *Discover Cities*, 1, 28. <https://doi.org/10.1007/s44327-024-00031-5>

[15] Timkina, S., Stepanchuk, O. V., & Bieliatynskyi, A. A. (2019). The design of the length of the route transport stops' landing pad on streets of the city. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708, 012032.

[16] Zhang, J., Cai, J., Wang, M., & Zhang, W. (2024). An estimation method for passenger flow volumes from and to bus stops based on land use elements: An experimental study. *Land*, 13(7), 971. <https://doi.org/10.3390/land13070971>

ABSTRACT

Stepanchuk O., Timkina S., Chernyshova O. Patterns of formation and movement of pedestrian flows in public transport stop areas

The article analyzes the patterns of formation and movement of pedestrian flows within the areas of influence of public transport stops. The factors affecting the composition and intensity of pedestrian movements in stop areas are examined, including the configuration of pedestrian zones, passenger flow intensity, the organization of boarding and alighting processes, and the presence of infrastructural elements. The interaction between pedestrians approaching transport, passengers alighting from vehicles, and transit pedestrians moving along sidewalks is considered. Particular attention is paid to the formation of local zones of increased pedestrian density and bottlenecks within stop areas. A pedestrian flow model is proposed that enables the assessment of pedestrian flow intensity, the capacity of pedestrian zones, and the parameters of passenger accumulation areas.

Purpose. *The aim of this study is to investigate the features of the formation and movement of pedestrian flows within the areas of influence of public transport stops, taking into account planning and operational factors.*

The methodological framework of the research is based on the theory of transport and pedestrian flows, system analysis methods, and mathematical modeling. Analytical approaches are applied to establish relationships between key pedestrian movement parameters: flow intensity, density, and walking speed. The structure of pedestrian flows in stop zones is analyzed, including passengers approaching transport, passengers alighting from vehicles, and transit pedestrians. The interaction between these flows is evaluated using a conflict coefficient. Methods for determining the capacity of pedestrian zones and calculating the required width of pedestrian spaces are also applied.

Results. The results of the study demonstrate that complex pedestrian flow structures are formed within public transport stop areas, including movements associated with boarding, alighting, and transit along sidewalks. The key factors influencing pedestrian flow parameters are identified, such as the configuration of stop areas, the width of pedestrian zones, passenger flow intensity, and the presence of infrastructural elements. The processes of bottleneck formation and pedestrian congestion are investigated. The developed model makes it possible to determine total and effective pedestrian flow intensity, assess the capacity of pedestrian zones, identify the critical number of pedestrian lanes, and calculate the required width of pedestrian spaces. In addition, the model allows the estimation of passenger accumulation areas within boarding zones.

Scientific novelty. The scientific novelty of the research lies in the development of an approach to modeling pedestrian flows in public transport stop areas that takes into account the interaction of three main flows: passengers approaching transport, passengers alighting from vehicles, and transit pedestrians. The model for assessing pedestrian flow parameters is improved through the introduction of a conflict coefficient, which makes it possible to account for the mutual interference of flows and its impact on the capacity of pedestrian zones. An approach for determining the critical number of pedestrian lanes and the required width of pedestrian zones is proposed, taking into consideration pedestrian comfort parameters.

Practical relevance. The practical significance of the results lies in the possibility of applying the proposed model to justify engineering and planning solutions in the design and reconstruction of public transport stops and adjacent pedestrian areas. The approach allows forecasting pedestrian flow intensity, determining optimal parameters of pedestrian zones, and assessing the capacity of pedestrian infrastructure. The implementation of the proposed solutions contributes to improving the efficiency of urban transport systems, enhancing traffic safety, and creating comfortable conditions for passenger movement.

Keywords: pedestrian flow, public transport stops, passenger flow, pedestrian capacity, pedestrian infrastructure, flow intensity, pedestrian density, pedestrian zone width, urban transport systems.

AUTHOR'S NOTE:

Stepanchuk Oleksandr, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Construction Computer Technologies State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, Ukraine, e-mail: oleksandr.stepanchuk@npp.nau.edu.ua, orcid: 0000-0002-2822-3471.

Timkina Svitlana, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Aviation Transport Infrastructure State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine, e-mail: svitlana.timkina@npp.nau.edu.ua, orcid: 0000-0003-2418-2032.

Chernyshova Oksana, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Aviation Transport Infrastructure State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, Ukraine, e-mail: oksana.chernyshova@npp.nau.edu.ua, orcid: 0000-0002-8132-2153.

Дата першого надходження статті до видання: 24.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії
відкритого доступу CC BY 4.0

