

В.О. Вдовиченко, О.С. Черепаха, С.Ю. Підлубний, М.В. Літинський

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

ФОРМУВАННЯ МЕРЕЖІ ЕВАКУАЦІЙНИХ АВТОБУСНИХ МАРШРУТІВ САЛТІВСЬКОГО ЖИТЛОВОГО МАСИВУ М. ХАРКОВА

Визначено послідовність формування евакуаційних автобусних маршрутів Салтівського житлового масиву м. Харкова, встановлено функціональний вплив експлуатаційних параметрів їх роботи на тривалість евакуації населення. Розроблена модель описує зв'язок між обсягом перевезення на маршрутах міського транспорту, часткою пасажирів, які підлягають евакуації, кількістю зупинних пунктів, довжиною маршрутів, швидкістю руху, часом посадки–висадки пасажирів, загальною тривалістю евакуації.

Ключові слова: евакуація населення, автобус, евакуаційний маршрут, обсяг перевезень, час руху.

Постановка проблеми

Евакуаційна мобільність населення під час воєнних дій або надзвичайних ситуацій є одним із найважливіших завдань у забезпеченні безпеки та порятунку громадян. Планування цієї мобільності потребує концептуального підходу, системного аналізу та комплексного підготовчого етапу [1–3]. Першочергове завдання у плануванні евакуації – це оцінка потенційної загрози та визначення зон, що можуть опинитися під впливом небезпечних дій. Це включає аналіз таких параметрів, як відстань до джерела загрози (лінії фронту), інфраструктура, наявність небезпечних об'єктів та інші чинники, що можуть вплинути на безпеку населення. Наступний етап – визначення способів та засобів евакуації. Важливою складовою у плануванні евакуації є інформаційна підтримка [4]. Поширення актуальної інформації про можливі загрози, місця евакуації, правила поведінки під час евакуації робить процес ефективним та допомагає запобігти паніці серед населення. Насамкінець планування маршрутів евакуаційної мобільності населення – це складний і відповідальний процес, який потребує системності та комплексного підходу. Він спрямований на захист та безпеку громадян під час воєнних дій, і його успішна реалізація здатна мінімізувати ризики та врятувати безліч життів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У разі виникнення надзвичайної ситуації, як-от природні катастрофи, техногенні аварії чи військові конфлікти, евакуація населення стає необхідним заходом для забезпечення безпеки людей [4, 5]. Одним із найефективніших і найширше використовуваних засобів масової евакуації є перевезення населення автобусами.

Першочерговим завданням для організації перевезення населення автобусами під час евакуації

є планування маршрутів. Необхідно створити ефективну систему, яка включає траси маршрутів, пункти збору населення, розподіл ресурсів, координацію з громадськими і приватними організаціями, а також інформування населення про порядок евакуації [2, 3].

При виборі автобусів для перевезення населення під час евакуації слід враховувати кілька чинників. Важливими критеріями є місткість автобусів, їх технічний стан, наявність додаткового обладнання для евакуації людей з інвалідністю [6]. Результативність евакуації населення автобусами залежить від ефективної маршрутизації та організації руху. При плануванні евакуаційних маршрутів необхідно врахувати географічні особливості місцевості, наявність запасних маршрутів, затори та перешкоди на дорогах. Крім того, система організації дорожнього руху може бути переналаштована для забезпечення швидкості та безпеки руху автобусів під час евакуації [7].

Для мінімізації часу посадки–висадки та покращення безпеки необхідно розробити ефективні системи організації черг та вхідних / вихідних точок маршрутів, а також забезпечити наявність достатньої кількості персоналу, який направлятиме пасажирів та підтримуватиме порядок під час перевезень [8].

При організації перевезення населення автобусами під час евакуації необхідно особливу увагу приділити питанням безпеки. Автобуси мають бути оснащені системами пожежогашіння та захисту, а також додатковими виходами у разі надзвичайної ситуації. Також важливим є навчання водіїв автобусів та іншого персоналу евакуаційним процедурам та правилам поведінки у кризових ситуаціях.

Перевезення населення автобусами є важливим інструментом масової евакуації у разі надзвичайних ситуацій. Організація перевезення вимагає ретельного планування, вибору відповідних автобусів, маршрутизації, організації посадки та зняття пасажирів, а також забезпечення безпеки всіх учасників процесу.

Всі ці заходи спрямовані на безпеку та збереження життя населення в умовах кризових ситуацій [9].

Весь комплекс експлуатаційної діяльності з організації пасажирських перевезень автобусами розділяється на дві основні частини. Перша частина включає організацію руху автобусів, основою якої є розробка раціонального плану перевезень пасажирів. Друга частина складається з диспетчерського керування рухом, спрямованого на забезпечення і найбільш ефективне виконання регулярності сполучення [10].

Сполучення маршрутної мережі автобусного транспорту з маршрутними системами інших видів пасажирського транспорту (зокрема магістрального залізничного сполучення) становить комплексну маршрутну систему міського пасажирського транспорту, що може бути задіяна для евакуації населення. Напрямок і довжина автобусної мережі в містах встановлюється з урахуванням забезпечення прямолінійного транспортного зв'язку між усіма районами міста і найголовнішими пунктами масового пересування. Вибір і обґрунтування параметрів маршрутної системи залежать насамперед від характеру розподілу пасажирських потоків та рівня взаємодії в транспортно-евакуаційних вузлах пересадки. Тому при вирішенні питань раціональної організації руху евакуаційних автобусів потрібно використовувати ефективні інструменти узгодження розкладів руху евакуаційних маршрутів та магістрального пасажирського транспорту [11].

Мета та завдання статті

Метою цієї роботи є розробка обґрунтованої послідовності формування евакуаційних автобусних маршрутів Салтівського житлового масиву м. Харкова та встановлення функціонального впливу експлуатаційних параметрів їх роботи на тривалість евакуації населення. Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

- надати характеристику складових елементів технологічного процесу обслуговування евакуаційних маршрутів;
- розробити структурний контур зв'язків об'єкта дослідження;
- провести експериментальні дослідження параметрів руху на шляху проходження евакуаційних автобусних маршрутів та надати аналіз отриманих результатів.

Виклад основного матеріалу

Під час активного обстрілу м. Харкова в лютому–березні 2022 р. значна кількість населення цього масиву вимушена була покинути власні домівки та виїхати за межі міста. Маючи такий досвід, мешканці міста можуть надати оцінку рівня організованості їх евакуації. Для цього була запропонована анкета, в якій містилася інформація про рівень організованості їх пересування. Під час опитування було проведено

інтерв'ювання 100 осіб, що здійснювали евакуацію із Салтівського масиву. За результатами опитування можна встановити, що рівень наданих транспортних послуг міського пасажирського транспорту (МПТ) з евакуації населення був дуже низьким. Менше половини з опитуваних (47 %) скористалися послугами МПТ, і лише 9 % з них скористалися наземним транспортом. Серед причин, що призвели до цього, насамперед є відсутність інформування населення про можливі варіанти переміщення на МПТ та відсутність автобусних маршрутів в середину житлових районів. За таких умов більшість населення, що мешкає поза зонами доступу станцій метрополітену, вимушені були скористатися послугами автомобілів-таксі. Основна частина тих, хто користувався транспортом (62 %), здійснювала пересування до Південного залізничного вокзалу з метою подальшої евакуації за межі регіону. Більшість опитуваних виявили свою незадоволеність, з погляду оцінки доступності (53 %) та гарантованості (40 %) МПТ для евакуації, що обумовлено відсутністю чіткої проробленої програми евакуації населення міста. По суті, евакуація населення відбувалася власними силами без участі органів управління транспортом м. Харкова. Відсутність оперативних маршрутів вивозу населення та інформації про розклад руху на маршрутах наземного МПТ призвело до того, що 73 % опитуваних дуже довго очікували поїздки, а в 46 % прибуття до пункту пересадки відбулося із запізненням. За результатами проведеного аналізу опитування мешканців м. Харкова встановлено, що рівень організації евакуаційних перевезень в 2022 р. був незадовільним, передусім через відсутність евакуаційних маршрутів в середину районів, що розташовані далеко від станцій метро, та розкладу руху на них.

Салтівський житловий масив є найбільшим житловим районом м. Харкова. На рис. 1 наведена схема Салтівського масиву із зонами доступності евакуації населення.



Рис. 1. Схема Салтівського масиву

Аналізуючи схему розташування ліній метрополітену в межах Салтівського масиву, можна побачити, що лише 40 % території знаходяться в зоні пішохідної доступності (відстань до 1,2 км). Вся інша територія потребує додаткового маршрутного сполучення. Таке сполучення повинно поєднувати станції метрополітену з пунктами локальної евакуації. Пункти локальної евакуації являють собою спеціальні місця на внутрішній території мікрорайонів, де облаштовані місця безпечного очікування транспорту. В таких пунктах встановлюють конструкції для укриття пасажирів, що очікують евакуаційний транспорт. Окрім укриття, поруч повинні бути розташовані бомбосховища, в яких може знаходитися велика кількість мешканців. Для вивезення мешканців Салтівського району можуть використовуватися як звичайні автобуси, так і броньовані автобуси залежно від поточної тактичної ситуації та інтенсивності військових дій. Практика виробництва спеціальних броньованих автобусів не набула поширення, однак існує в світі. На рис. 2 представлено зовнішній вигляд захисних споруджень, що використовуються у Харкові з осені 2022 р., та броньований автобус, який був виготовлений у Великобританії в 80-х роках 20-го сторіччя. Такий автобус має місткість 36 пас. для міжміських та 48 пас. для міських перевезень, його вага становить 17,5 т. Він має броньовану капсулу для пасажирів, що витримує влучання зі стрілецької зброї калібру 7,62 мм та уламки від реактивної артилерії.



Рис. 2. Вигляд укриття для пасажирів та броньованого автобусу

Зважаючи на сучасні реалії України та військову агресію проти неї, доцільно створити спеціальний резервний парк евакуаційних автобусів. Його призначення – забезпечення евакуації населення з місць загроз життю. У разі необхідності замість броньованих автобусів може застосовуватися спеціальна військова броньована техніка, яка адаптована для перевезення населення. Однак спеціальна військова техніка має значно обмежену місткість, вона спеціально спроектована для переміщення військ, має низку обмежень за швидкісними параметрами та є значно дорожчою у виробництві. Досвід створення броньованої цивільної техніки існує давно: вулицями міст курсують броньовані мікроавтобуси служб інкасації та легкові автомобілі. За основу броньованого автобусу береться платформа потужного вантажного автомобіля, на

базу якої встановлюється броньована пасажирська капсула. Однак, окрім технічних особливостей виробництва, важливу роль відіграють технологічні параметри експлуатації, що залежать від умов організації руху таких автобусів. На прикладі Салтівського житлового масиву можна розглянути принципи організації роботи броньованих автобусів та встановити необхідний їх парк. З огляду на те, що Салтівський житловий масив є найбільшим житловим масивом в Україні, а чисельність його населення становить близько 400 тис. осіб, можна зробити висновок, що це повною мірою дає підстави для проведення експериментального розрахунку складу парку автобусів. Дослідження параметрів транспортного процесу організації евакуації населення району передбачає проведення низки базових процедур:

- визначення місць розташування пунктів локальної евакуації населення;
- розробки трас сполучення місць локальної евакуації населення та станцій метро або інших безпечних місць пересадки;
- аналізу часових параметрів здійснення евакуації населення при різній кількості парку рухомого складу евакуаційних автобусів;
- визначення раціональної кількості автобусів за умов дотримання часових норм евакуації.

Визначення раціональних місць розташування пунктів локальної евакуації населення відбувається на основі аналізу планування району, розташування забудов, поточної тактичної обстановки, відстані та безпеки пересування пасажирів до пунктів відправлення. Такі пункти мають бути розосереджені на території мікрорайонів, що забезпечує мінімальну відстань підходу населення. Можлива оперативна установка пересувного укриття в місцях, де існує загроза обстрілів. Також повинні застосовуватися укриття для населення, спеціально облаштовані в будинках, та підземні приміщення. Об'єкти накопичення людей повинні бути заздалегідь облаштовані, а населення – оперативно проінформовано про їх розташування.

При визначенні маршрутів основним критерієм є мінімізація часу руху автобусів до кінцевого пункту пересадки. Проходження траси маршруту також повинно узгоджуватися з оперативною військовою ситуацією, що складається в районі евакуації. Маршрути мають бути заздалегідь сплановані, але їх варіація повинна забезпечувати можливість проїзду декількома шляхами сполучення. Це дасть змогу в найкоротший час застосувати готові рішення, а значна варіативність шляхів проходження забезпечить можливість знизити ймовірність потрапляння автобуса в зону ураження.

Аналіз часових параметрів руху по ділянках транспортної мережі району є основою для визначення раціональної кількості парку автобусів та режимів їх роботи за умови своєчасного та повного

забезпечення евакуації населення. По суті, саме часові параметри руху автобусів по маршрутах разом з місткістю визначають провізні можливості, що в подальшому дає змогу розрахувати необхідну їх кількість. В умовах бойових дій планування швидкісного режиму не можливе, тому доцільно розглядати можливі варіанти швидкості руху та на їх основі визначати кількісну структуру парку автобусів. На рис. 3 наведені базові маршрути сполучення пунктів локальної евакуації населення Салтівського масиву зі станціями метрополітену.

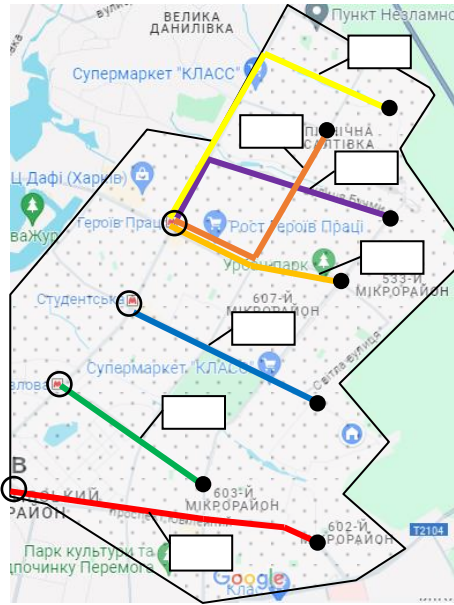


Рис. 3. Базові маршрути евакуації

Базові характеристики евакуаційних маршрутів можуть бути визначені на основі обстеження транспортної мережі району. Однак окрім явних характеристик маршруту, зокрема довжини та часу переміщення, важливим для розрахунків є встановлення обсягу перевезень на цих маршрутах.

Визначення обсягу перевезень базується на тому, що існує зв'язок між обсягом перевезення пасажирів на наявних маршрутах міського транспорту та можливим обсягом евакуації населення. Природно, що ті, хто будуть користуватися евакуаційним маршрутом, в мирний час застосовують для своїх пересувань маршрут МПТ, який проходить до певної станції метрополітену. Звичайно, такий обсяг корегується за допомогою коефіцієнта, що визначається складом населення та рівнем використання автомобілів для таких пересувань. У табл. 1 представлено дані про маршрути евакуації та їх прив'язку до маршрутів МПТ.

В умовах військових дій швидке та безпечне пересування населення до безпечних місць є важливим завданням. Для дослідження такого процесу на першому кроці необхідно розробити структури зв'язків моделі технологічного процесу обслуговування населення автобусами з аспектом на евакуаційні перевезення. Аналізуючи це, необхідно врахувати різні чинники впливу на показники транспортного процесу, включно із графіками руху автобусів, пасажиропотоками на різних ділянках та напрямках маршрутів, технологічними особливостями таких перевезень, готовністю автобусів до експлуатації та безпекою пасажирів під час переміщення.

Таблиця 1

Базові маршрути евакуації населення Салтівського житлового масиву

Номер	Маршрут евакуації	Довжина, км	Маршрути МПТ, що забезпечують сполучення
№ 1	602 мкр-н – ст. м. «Академіка Барабашова»	4,5	Тл19, Тл20, Тл24, 10е, 38е, 63е, 94е
№ 2	вул. В. Стуса – ст. м. «Академіка Павлова»	1,9	259е
№ 3	вул. Гарібальді – ст. м. «Студентська»	2,2	Тл34
№ 4	вул. Світла – ст. м. «Героїв Праці»	2,4	47е, 222е
№ 5	вул. Бучми – ст. м. «Героїв Праці»	2,9	222е
№ 6	вул. Гв. Широнінців – ст. м. «Героїв Праці»	2,5	Тл31, Тл35, 106е, 204е
№ 7	вул. Н. Ужвій – ст. м. «Героїв Праці»	3,6	41е, 48е

Структура контуру функціональних зв'язків моделі перевезення евакуаційними автобусами ґрунтується на обліку наступних вимог:

- маршрутизація: встановлення трас та розташування пунктів локальної евакуації для забезпечення доступності для населення;
- визначення параметрів роботи маршрутів: встановлення часових характеристик руху на маршрутах та їх загального пробігу;
- оцінка можливого попиту: необхідно спрогнозувати обсяг перевезення по маршрутам;

- визначення потрібної кількості ресурсів (автобуси та водії): оптимізація перевезень з метою раціонального розподілу ресурсів;
- планування: розробка графіка руху автобусів, що враховує наявний попит на евакуацію та забезпечує зручність для населення;
- обслуговування та підтримка технічного стану автобусів: забезпечення надійного технічного стану автобусів та їх регулярне обслуговування;

– оперативне управління та контроль: постійний зв'язок з водіями щодо аналізу поточної ситуації, а також оперативні зміни забезпечення мобільності

перевезень.

Структурний контур функціонального зв'язку представлено у вигляді схеми, що зображена на рис. 4.

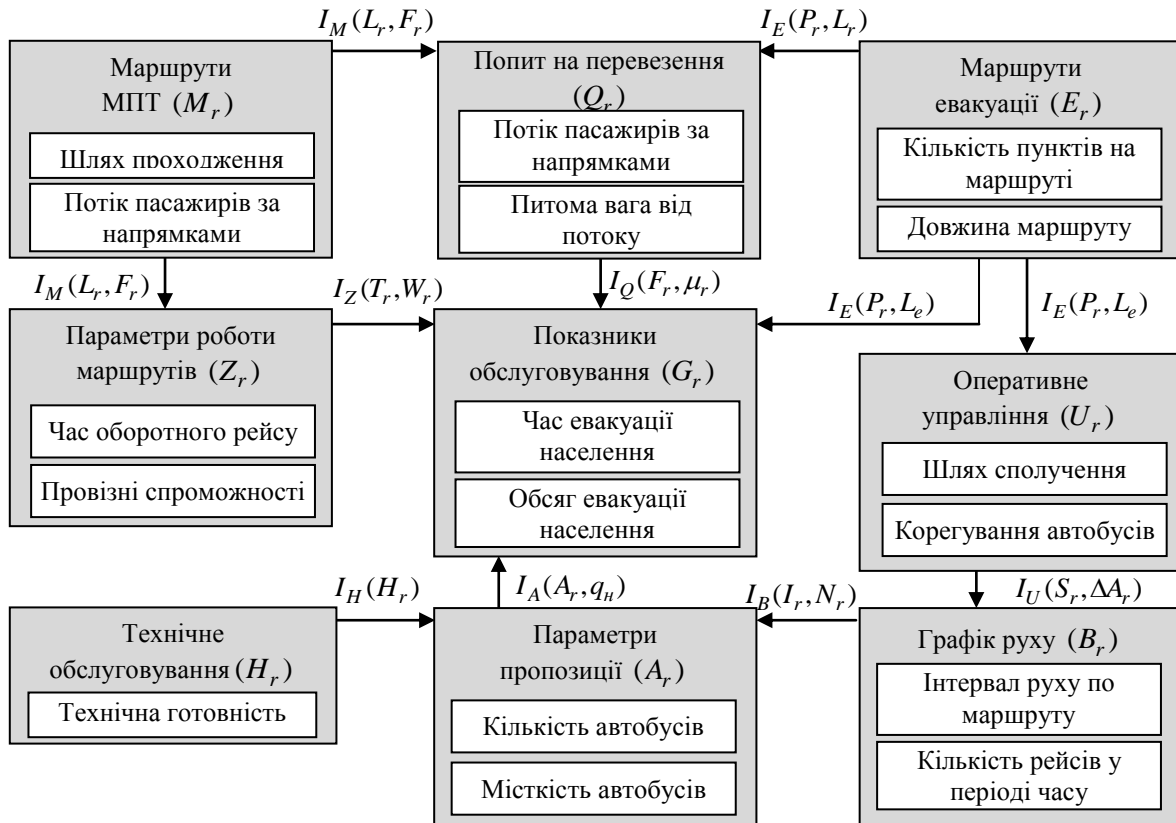


Рис. 4. Схема структурного контуру функціонального зв'язку об'єкта дослідження

На схемі позначені наступні інформаційні потоки: $I_M(L_r, F_r)$ – інформація про параметри маршрутів МПТ; $I_E(P_r, L_r)$ – інформація про параметри маршрутів евакуації населення; $I_Q(F_r, \mu_r)$ – інформація про попит на маршрутах МПТ та частку обсягу евакуаційних перевезень; $I_Z(T_r, W_r)$ – інформація про експлуатаційні показники руху транспортних засобів на маршрутах; $I_U(S_r, \Delta A_r)$ – інформація про шлях сполучення та корегування кількості автобусів на маршрутах; $I_B(I_r, N_r)$ – інформація про графіки руху на евакуаційних маршрутах; $I_H(H_r)$ – інформація про стан технічної готовності автобусів; $I_A(A_r, q_n)$ – інформація про параметри транспортної пропозиції.

Розглядаючи представлену схему структурного контуру зв'язку об'єкта дослідження, можна описати наступні характеристичні зв'язки. Вихідними даними є інформація про наявні маршрути міського пасажирського транспорту (I_M). На основі співставлення шляху проходження маршрутів міського пасажирського транспорту (L_r) визначаються напрямки, що

відповідають маршрутам евакуації населення (E_r). Відповідно до визначених груп маршрутів встановлюється кількість пасажирів, що користуються міським пасажирським транспортом. Ця інформація є вихідною для встановлення можливого попиту перевезення під час евакуації (F_r). Враховуючи питому вагу пасажирів, що будуть користуватися евакуаційними маршрутами (μ_r), можна встановити прогнозований обсяг попиту на перевезення евакуаційними маршрутами (F_e). Інформація про наявні маршрути МПТ дає змогу встановити параметри роботи евакуаційних маршрутів, а саме визначити на основі технічної швидкості та часу простою тривалість оборотного рейсу та, відповідно, провізні спроможності евакуаційних маршрутів. Залежно від довжини евакуаційного маршруту (L_e) та кількості пунктів посадки пасажирів (P_r) визначається час оберту ($t_{об}$), який є стохастичною (змінною) величиною. Тривалість оборотного рейсу залежить від кількості пунктів посадки пасажирів (P_r), технічної швидкості (V_m), довжини маршруту (L_e), тривалості простою

під час посадки (t_n) та висадки пасажирів (t_g), інших непрогнозованих позаштатних явищ, що можуть відбутися під час військових дій в зоні проходження маршрутів. На основі оперативного управління може бути прийнято рішення про визначення раціонального шляху сполучення між пунктами відправки та пунктами прибуття евакуаційних маршрутів (S_r). Також в оперативному режимі може відбуватися коригування розподілу евакуаційних автобусів між маршрутами. Це дасть змогу планувати графік руху відповідно до поточної ситуації, що склалася в районі перевезень, а також сформувати раціональний розподіл парку рухомого складу між маршрутами евакуації. Ключовим параметром, що визначає тривалість евакуації (T_e) та обсяг населення (Q_e), який може бути вивезено з районів, є кількість автобусів (A_r) та їх місткість (q_n). Причому слід врахувати, що параметри транспортної пропозиції залежать від рівня технічного обслуговування рухомого складу та його технічної готовності. Основними показниками, що визначають ефективність процесу евакуації, є час евакуації населення (T_e) та можливий обсяг евакуації протягом дня (Q_e) по кожному маршруту евакуації. На основі цієї інформації можуть бути прийняті відповідні управлінські рішення щодо проведення військових операцій на території, яка є прилеглою до зони евакуації. Показники обслуговування, а саме час евакуації населення (T_e) та обсяги евакуації населення (Q_e) безпосередньо залежать від кількості автобусів, їх місткості та часових параметрів руху автобусів на маршрутах евакуації. Встановлення часу оборотного рейсу на маршруті евакуації може бути реалізовано шляхом проведення натурних спостережень за наявними маршрутами міського пасажирського транспорту. На основі цієї інформації може бути визначена технічна швидкість руху (V_m) ділянками дорожньої мережі міста, де проходять маршрути евакуації, та визначений час посадки (t_n) та висадки (t_g) пасажирів під час перевезень. Параметри посадки–висадки пасажирів повинні бути відкореговані з урахуванням того, що евакуація передбачає переміщення пасажирів з багажем. Також слід врахувати, що показники використання автобусів можуть мати значення коефіцієнта використання місткості автобусу на рівні, що значною мірою перевищує номінальну місткість ($\gamma_c = 1,5-2$). Це стає можливим тому, що евакуація відбувається в екстрених режимах, а довжина маршрутів не перевищує 5 км, що дозволяє реалізувати процес поїздки протягом не більше 15–20 хв. За результатами розробленої структури зв'язку можна визначити базові елементи

імітаційної моделі. Основними параметрами управління є кількість евакуаційних автобусів та їх місткість. Вихідними даними є характеристики можливого обсягу перевезень на евакуаційних маршрутах та параметри руху. Випадковими величинами є час посадки–висадки, час руху та технічна швидкість на маршрутах.

Одним із досить поширених способів дослідження складних процесів є моделювання. Першим етапом моделювання є вибір моделі та представлення концепції зв'язків вхідних, випадкових, керованих та вихідних параметрів. Загальна структура моделі показників оцінки ефективності маршрутів наведена на рис. 5.

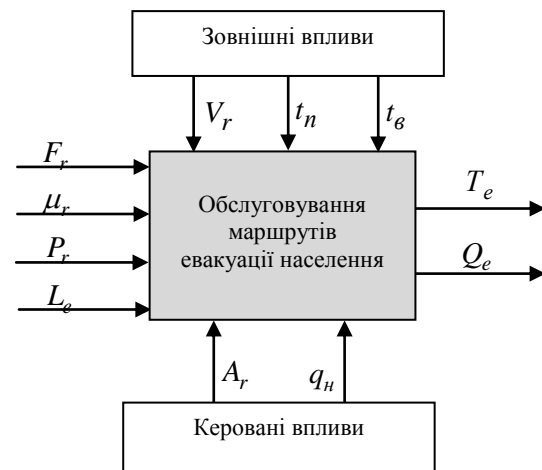


Рис. 5. Загальна структура моделі оцінки ефективності маршрутів

Як вхідні параметри моделі обрано: F_r – обсяг перевезення на маршрутах МПТ в напрямку виїзду з району, пас./період; μ_r – питома вага пасажирів з маршрутів МПТ, що потенційно можуть підлягати евакуації; P_r – кількість зупинних пунктів на маршруті евакуації; L_e – довжина маршруту евакуації, км. Зовнішніми впливами є: V_r – швидкість руху на маршрутах, км/год; t_n – час простою в пункті посадки пасажирів, год; t_g – час простою в пункті висадки, год. Керовані величини: q_n – місткість автобуса, пас.; A_r – кількість автобусів на маршруті, од. Вихідні параметри: T_e – загальний час евакуації населення, год; Q_e – обсяг евакуації населення за день, пас. Контур зв'язків дозволяє встановити послідовність та етапи розробки моделі визначення показників ефективності.

Оцінка ефективності формування маршрутів евакуаційної мобільності населення може проводитись за допомогою різних методів, включно із математичним моделюванням, аналізом даних про насе-

лення та інфраструктуру, а також врахуванням досвіду небезпечних ситуацій та евакуацій. Розробка критерію оцінки ефективності формування маршрутів евакуаційної мобільності населення вимагає всебічного підходу та врахування багатьох факторів. Він повинен забезпечувати оптимальні умови для швидкої та безпечної евакуації населення у разі виникнення надзвичайних ситуацій чи аварій. Загальний вигляд критерію ефективності є наступним:

$$\begin{cases} T_e \rightarrow \min \\ Q_e \rightarrow \max \end{cases} \quad (1)$$

Критерій ефективності (1) містить два елементи. За таких умов це відповідає багатокритеріальній задачі оптимізації. При такій постановці для встановлення оптимуму функції можливо використати метод головного критерію. Він передбачає виділення головної складової та другорядної. Тоді один критерій стає оптимізаційним, а інший – входить до системи обмежень або є другорядним та використовується для аналізу. З огляду на це, цільова функція може бути представлена у вигляді оптимізації:

$$T_e^r = \frac{F_r \cdot \mu_r \cdot t_{об}^r}{A_r \cdot q_H}, r = (1, E_r) \rightarrow \min, \quad (2)$$

де F_r – обсяг перевезення на маршрутах МПТ в напрямку виїзду з району евакуації, пас./період;

μ_r – коефіцієнт, що відтворює співвідношення між обсягом перевезень МПТ та маршрутами евакуації;

$t_{об}^r$ – середній час оборотного рейсу, год;

A_r – кількість автобусів на маршруті, од.;

q_H – місткість автобусу, пас.;

E_r – кількість маршрутів евакуації.

Цільова функція (2) застосовується разом з системою обмеження:

$$\begin{cases} 100 \leq F_{ri} \leq 2000 \text{ пас./год.}; \\ 10 \leq \mu_{ri} \leq 12; \\ 1 \leq P_r \leq 3; \\ 1,9 \text{ км.} \leq L_e \leq 4,5 \text{ км.}; \end{cases} \quad (3)$$

де F_r – обсяг перевезення на маршрутах МПТ в напрямку виїзду з району евакуації, пас./період;

μ_r – коефіцієнт співвідношення обсягу;

P_r – кількість зупинних пунктів на маршруті;

L_e – довжина маршруту евакуації, км.

Обсяг перевезення на маршрутах за день евакуації може бути представлений у вигляді оптимізаційної

функції:

$$Q_e^r = \frac{A_r \cdot q_H \cdot T_0}{t_{об}^r}, r = (1, E_r) \rightarrow \max, \quad (4)$$

де T_0 – час роботи маршруту протягом дня, год.

Характер розподілу пасажиропотоку на маршрутах впливає на використання місткості автобусів, визначає розподіл їх парку та безпосередньо визначає умови забезпечення евакуаційної мобільності населення. Зважаючи на поточну ситуацію, запропоновано для обстеження пасажиропотоку МПТ використати методику, при якій визначається інтенсивність руху та рівень заповнення транспортних засобів на основі вибірових спостережень за роботою маршрутів. А загальна інтенсивність руху МПТ визначається на основі довідкових даних про характеристику маршрутів мережі, яка була сформована в м. Харкові до 2022 р. Це дасть змогу визначити обсяги перевезень на маршрутах, які були сформовані під час мирного періоду життя. Обсяг перевезення на маршрутах встановлюється з урахуванням коефіцієнта, який враховує нерівномірність потоку, обсяг пересувань відносно загальної чисельності населення та частку пересувань, що здійснюється в ранковий період. За аналізом попиту значення такого коефіцієнта знаходиться в діапазоні від 10,8 до 12 залежно від маршрутів.

Встановлення показників тривалості посадки–висадки та технічної швидкості руху реалізується шляхом проведення натурних спостережень за рухом транспортних засобів на автобусному маршруті № 106е «ст. м. Героїв Праці – Північна Салтівка». Для подальшого моделювання необхідно провести аналіз розподілу параметрів руху. На рис. 6 представлений розподіл значення середнього часу посадки пасажирів в автобус.

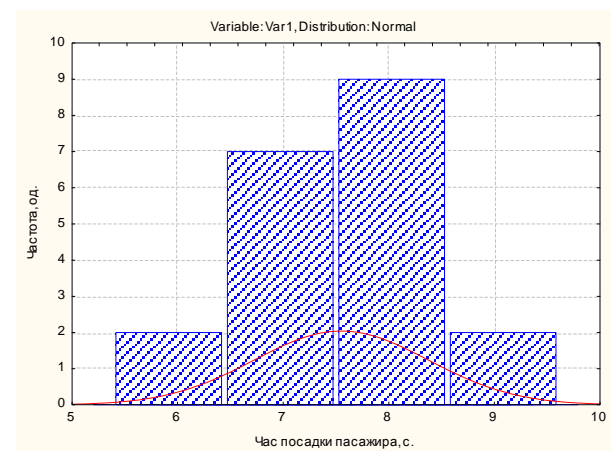


Рис. 6. Розподіл середнього часу посадки пасажирів в автобус

На рис. 7 представлений розподіл значення технічної швидкості руху на маршруті.

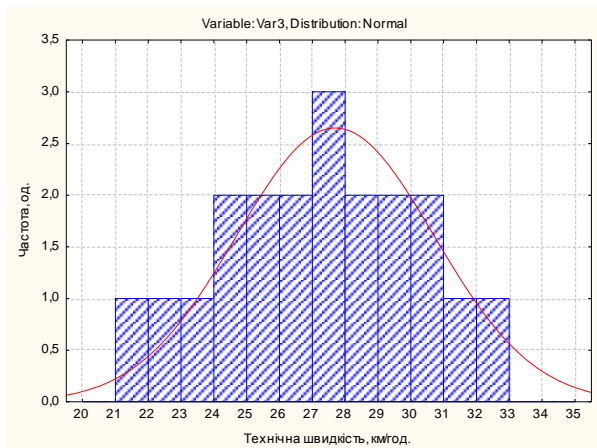


Рис. 7. Розподіл технічної швидкості руху на маршруті

Як видно з графіків, показники рухових операцій змінюються за нормальним законом, що свідчить про наявність чинників впливу на стабільність рухових операцій.

Як базова гіпотеза виступає вибір моделі, яка полягає у виборі виду функції:

$$T_e = f(A_r, q_{HR}), r = (\overline{1, E_r}); \quad (5)$$

$$Q_e = f(A_r, q_{HR}), r = (\overline{1, E_r}), \quad (6)$$

- де T_e – загальний час евакуації, год;
 Q_e – обсяг евакуації за день, пас.;
 A_r – кількість автобусів на маршруті, од.;
 q_{HR} – місткість автобуса, пас.;
 E_r – кількість маршрутів евакуації.

Екстремум $T_e \rightarrow \min$ відповідає найкращому стану системи евакуаційної мобільності та набуває мінімального значення при раціональній кількості автобусів. У межах виділених обмежень для кожного чинника (A_r, q_{HR}) потрібно вибрати основний рівень та інтервал варіювання, які і будуть безпосередньо використані при плануванні експерименту.

Значення параметра фактичної місткості автобуса обирається з огляду на можливий рівень використання його місткості (можна прийняти значення $\gamma_c^{\min} = 1, \gamma_c^{\text{mid}} = 1,25, \gamma_c^{\max} = 1,5$). Тоді прийнято три варіанти місткості автобуса: $q_H \in (q_H^{\min}, q_H^{\text{mid}}, q_H^{\max})$, а саме $q_H^{\min} = 48$ пас., $q_H^{\text{mid}} = 60$ пас., $q_H^{\max} = 72$ пас. Кількість автобусів для кожного маршруту представлено також трьома рівнями $A_r \in (A_r^{\min}, A_r^{\text{mid}}, A_r^{\max})$,

а саме A_r^{\min} – мінімальна кількість автобусів (визначається на 25 % менше, ніж розрахункова кількість); A_r^{mid} – базова кількість автобусів (визначається на основі розрахунків потрібної кількості за умови розподілу обсягу перевезень на 3 дні евакуації); A_r^{\max} – максимальна кількість автобусів (на 25 % більше, ніж розрахункова кількість евакуаційних автобусів).

Для прикладу моделювання обрано евакуаційний маршрут № 6 «вул. Гв. Широнінців – ст. м. «Героїв Праці», що забезпечує процес переміщення мешканців Північної Салтівки до ст. м. «Героїв Праці». На сьогодні це сполучення обслуговується автобусними та тролейбусними маршрутами. Для цього маршруту кількість автобусів, що відповідає визначеним рівням варіювання чинника A_r , дорівнює наступним значенням: $A_r^{\min} = 2$ од., $A_r^{\text{mid}} = 3$ од., $A_r^{\max} = 4$ од.

На рис. 8 та 9 зображена зміна часу евакуації населення та добового обсягу евакуації (при роботі автобуса 20 год на добу) для маршруту № 6 при різних кількостях евакуаційних автобусів (при $q_H = 48$ пас. та $q_H = 60$ пас.).

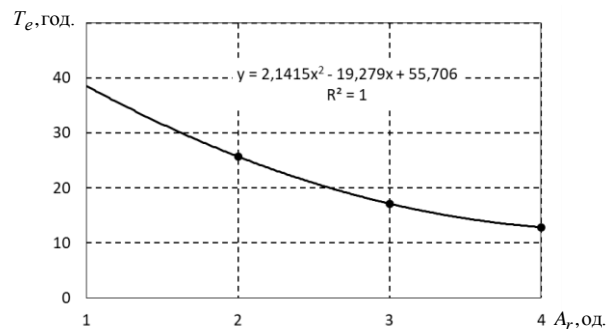


Рис. 8. Зміна часу евакуації населення залежно від кількості автобусів на маршруті № 6 (при $q_H = 48$ пас.)

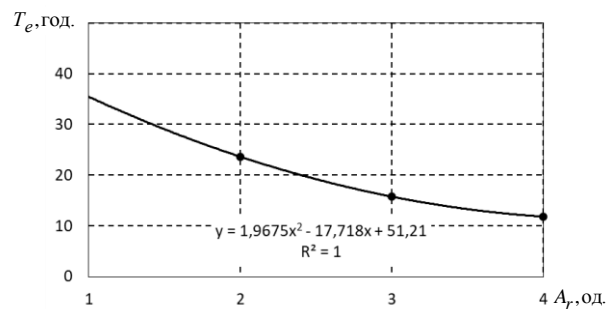


Рис. 9. Зміна часу евакуації населення залежно від кількості автобусів на маршруті № 6 (при $q_H = 60$ пас.)

Аналізуючи отримані залежності, можна зробити наступні висновки. При використанні автобусів в межах номінальної місткості для забезпечення вивозу всіх пасажирів на маршруті № 6 спостерігається скорочення часу залежно від кількості автобусів. Така закономірність описується поліномом другого ступеня з високим рівнем кореляції. При використанні 1 автобуса середній час евакуації становитиме на рівні 39 год безперервної роботи, при збільшенні до 2 автобусів – 25,7 год, при 3 автобусах – 17,1 год, при 4 автобусах – 12,8 год. За умов, що евакуація може проводитися протягом 2 днів (населення не одразу приймає рішення та поступово прибуває на пункти вивезення), для маршруту № 6 можна використати 2 автобуси. При використанні 2 автобусів з місткістю на рівні 1,25 тривалість евакуації становить від 19,7 до 27,8 год залежно від затримок під час руху та посадки–висадки пасажирів, тоді як середній час евакуації становить 23,6 год.

Для інших евакуаційних маршрутів аналогічним способом було встановлено параметри попиту та в процесі моделювання визначено тривалість часу, необхідного для забезпечення евакуації населення. У табл. 2 представлено значення показників обслуговування для трьох базових варіантів розподілу автобусів між маршрутами.

Таблиця 2

Порівняння варіантів евакуаційного плану

Номер варіанта	Кількість автобусів	Час евакуації населення, год
Варіант 1	16	13,9–23,5
Варіант 2	9	26,9–46,7
Варіант 3	12	18,3–31,7

Перший варіант плану передбачає використання 16 евакуаційних автобусів (по 3 автобуси на маршрутах № 1, 3 та по 2 автобуси на всіх інших маршрутах). Під час розподілу автобусів між маршрутами очікується, що загальний час евакуації населення залежно від маршруту буде змінюватися в діапазоні від 13,9 до 23,5 год. При реалізації другого варіанта забезпечення плану евакуації необхідно залучення мінімальної кількості автобусів, а саме 9 одиниць. Середній час евакуації на маршрутах змінюється від 26,9 до 47 год. Варіант 3 передбачає 12 автобусів (по 1 автобусу на маршрутах № 5, 7 та по 2 автобуси на інших маршрутах), тоді очікуваний середній час евакуації на маршрутах буде знаходитися в діапазоні від 18,3 до 31,7 год. На основі аналізу даних щодо тривалості евакуації та обсягу витрат можна дійти висновку, що варіант 3 є повністю придатним з погляду термінів проведення евакуації та забезпечує допустимий рівень капітальних вкладень для створення повноцінної системи евакуації населення Салтівського району. Загальна кількість автобусів,

що використовуються при цьому варіанті становить 12 одиниць.

Висновки

На основі аналізу розташування ліній метрополітену на території Салтівського масиву встановлено, що населення, яке проживає на більше ніж 60 % площі району, не може дістатися до станції метрополітену без використання наземного транспорту. Під час аналізу об'єкта дослідження визначено, що доцільною є розробка евакуаційних маршрутів, які забезпечують сполучення населення зі станціями метрополітену. Такі маршрути мають довжину від 1,9 до 4,5 км. З огляду на наявні маршрути міського пасажирського транспорту встановлено, що для визначення обсягу перевезень можна використати інформацію щодо наявних маршрутів пасажирського транспорту.

На основі аналізу процесів взаємодії сформовано схему структурного контуру функціонального зв'язку об'єкта. Розроблені аналітичні моделі дозволяють встановити низку показників, що характеризують процес роботи евакуаційних маршрутів. Розроблені теоретичні основи є базою для імітаційного моделювання та встановлення закономірності зміни показників ефективності евакуації залежно від керованих параметрів.

План модельного експерименту враховує можливість використання різної кількості автобусів на маршрутах та різного рівня використання місткості автобусів. За результатами моделювання встановлено зміну значення показників ефективності та обрано раціональні значення кількості автобусів.

Література

1. An agent-based dynamic framework for population evacuation management / H. Idoudi, M. Ameli, C. N. Van Phu, M. Zargayouna, A. Rachedi // *IEEE Access*, – 2022 – Vol. 10 – P. 88606-88620.
2. Комяк В. М., Комяк В. В., Кязімов К. Т. Організаційно-технічні методи аварійної евакуації населення із зони надзвичайної ситуації. / В. М. Комяк, В. В. Комяк, К. Т. Кязімов // *Проблеми надзвичайних ситуацій*. – 2022 – №35. – С. 270-285. DOI:10.52363/2524-0226-2022-35-20.
3. Невінчаний О. В., Замислов С. С. Проблеми та шляхи удосконалення технічного регулювання заходів щодо евакуації населення у разі загрози або виникнення надзвичайних ситуацій / О. В. Невінчаний, С. С. Замислов // *Науковий вісник УкрНДІПБ*. – 2014. – №1(29). – С. 85-88. Режим доступу: https://firesafety.at.ua/visnyk/2014_No_1-29, вільний. (дата звернення: 10.04.2024).
4. Zhang N., Huang H., Su B., Zhang H. Population evacuation analysis: considering dynamic population vulnerability distribution and disaster information dissemination / N. Zhang, H. Huang, B. Su, H. Zhang // *Natural hazards*. – 2013. – Vol. 69. – P. 1629-1646. DOI: 10.1007/s11069-013-0767-y
5. Relationships between evacuation population size, earthquake emergency shelter capacity, and evacuation time / X. Zhao, W. Xu, Y. Ma, L. Qin, J. Zhang, Y. Wang // *International Journal of Disaster Risk Science*. – 2017. – Vol. 8. – P. 457-470. DOI: 10.1007/s13753-017-0157-2

6. Bolia N. B. Operating strategies of buses for mass evacuation / N. B. Bolia // *Safety science*. – 2019. – Vol. 111. – P. 167-178. DOI: [10.1016/j.ssci.2018.07.007](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.07.007)
7. Qazi A. N., Nara Y., Okubo K., Kubota H. Demand variations and evacuation route flexibility in short-notice bus-based evacuation planning / A. N. Qazi, Y. Nara, K. Okubo, H. Kubota // *IATSS research*. 2017. – Vol. 41(4). – P. 147-152. DOI: [10.1016/j.iatssr.2017.01.002](https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2017.01.002)
8. Teichmann D., Dorda M., Sousek R. Creation of preventive mass evacuation plan with the use of public transport / D. Teichmann, M. Dorda, R. Sousek // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2021. – Vol. 210. – P. 107437. DOI: [10.1016/j.ress.2021.107437](https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107437)
9. Bish D. R. Planning for a bus-based evacuation / D. R. Bish // *OR spectrum*. – 2011. – Vol. 33(3). – P. 629-654. DOI: [10.1007/s00291-011-0256-1](https://doi.org/10.1007/s00291-011-0256-1)
10. Markevych A., Vdovychenko V., Ivanov I. Influence of bus service downtime in the transport interchange on the duration of inter-route transfer of passengers / A. Markevych, V. Vdovychenko, I. Ivanov // *Technology Audit and Production Reserves*. 2021. – Vol. 3/2(59). – P. 6-10. DOI: [10.15587/2706-5448.2021.231465](https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.231465)
11. Vdovychenko V. Analysis of the formation of fluctuations of service time of vehicles in transport-transfer stations of urban passenger transport / V. Vdovychenko // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2017. – Vol. №2 (36). – P. 37-43. DOI: [10.15587/2312-8372.2017.109116](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.109116)

References

1. Idoudi, H., Ameli, M., Van Phu, C. N., Zargayouna, M., & Rachedi, A. (2022). An agent-based dynamic framework for population evacuation management. *IEEE Access*, 10, 88606-88620.
2. Komyak, V. M., Komyak, V. V., & Kyazimov, K. T. (2022). Organizational and technical methods of emergency evacuation of the population from the zone of emergency situation. *Problems of Emergency Situations*, 35, 270-285. <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2022-35-20> [in Ukrainian].
3. Nevinchanyy, O. & Zamyslov S. (2014). Problems and their solutions improvement of technical regulation regarding the evacuation in the event of threats or emergencies. *Scientific bulletin: Civil protection and fire safety*, 1(29), 85-88. [in Ukrainian].
4. Zhang, N., Huang, H., Su, B., & Zhang, H. (2013). Population evacuation analysis: considering dynamic population vulnerability distribution and disaster information dissemination. *Natural hazards*, 69, 1629-1646. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-013-0767-y>
5. Zhao, X., Xu, W., Ma, Y., Qin, L., Zhang, J., & Wang, Y. (2017). Relationships between evacuation population size, earthquake emergency shelter capacity, and evacuation time. *International Journal of Disaster Risk Science*, 8, 457-470. <http://dx.doi.org/10.1007/s13753-017-0157-2>
6. Bolia, N. B. (2019). Operating strategies of buses for mass evacuation. *Safety science*, 111, 167-178. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2018.07.007>
7. Qazi, A. N., Nara, Y., Okubo, K., & Kubota, H. (2017).

- Demand variations and evacuation route flexibility in short-notice bus-based evacuation planning. *IATSS research*, 41(4), 147-152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.iatssr.2017.01.002>
8. Teichmann, D., Dorda, M., & Sousek, R. (2021). Creation of preventive mass evacuation plan with the use of public transport. *Reliability Engineering & System Safety*, 210, 107437. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107437>
9. Bish, D. R. (2011). Planning for a bus-based evacuation. *OR spectrum*, 33(3), 629-654. <http://dx.doi.org/10.1007/s00291-011-0256-1>
10. Markevych, A., Vdovychenko, V., & Ivanov, I. (2021). Influence of bus service downtime in the transport interchange on the duration of inter-route transfer of passengers. *Technology Audit and Production Reserves*, 3/2(59), 6-10. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.231465>
11. Vdovychenko, V. (2017). Analysis of the formation of fluctuations of service time of vehicles in transport-transfer stations of urban passenger transport. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(36), 37-43. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.109116>

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.М. Турпак, Національний університет «Запорізька політехніка», Україна.

Автор: ВДОВИЧЕНКО Володимир Олексійович
доктор технічних наук, доцент, професор кафедри транспортних технологій
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
E-mail – Vval2301@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2746-8175>

Автор: ЧЕРЕПАХА Олександр Сергійович
кандидат технічних наук, асистент кафедри транспортних технологій
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
E-mail – Stt_0014@ukr.net
ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6129-1945>

Автор: ПІДЛУБНИЙ Сергій Юрійович
аспірант кафедри транспортних технологій
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
E-mail – pidlubnyi_s@ukr.net
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4840-7363>

Автор: ЛІТИНСЬКИЙ Максим Валерійович
аспірант кафедри транспортних технологій
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
E-mail – litinskiymaksim91@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1803-8639>

**FORMATION OF A NETWORK OF EVACUATION BUS ROUTES FOR THE SALTIV
RESIDENTIAL AREA OF KHARKIV**

V. Vdovychenko, O. Cherepakha, S. Pidlubnyi, M. Litynskyi

Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine

Evacuation mobility of the population during military operations or emergencies is one of the most vital tasks in ensuring the safety and rescue of citizens. Planning this mobility requires a conceptual approach, system analysis, and a comprehensive preparatory stage. The primary task for organising the population's bus transportation during evacuation is planning routes and determining their time parameters. This process requires preliminary determination of the points of traffic organisation, establishment of routes and meeting points, allocation of resources, and coordination of work with other types of passenger transport.

The study aims to develop the sequence of formation of evacuation bus routes in the Saltiv residential area of Kharkiv and to establish the functional effect of operational parameters of their work on the duration of population evacuation.

The methodological basis for building a network of evacuation bus routes is a developed structural model of the impact of input parameters on the general evacuation time for the population and the transport capabilities of the routes. This model describes the functional relationship between the existing volume of passenger transportation on urban transport routes, the share of passengers subject to evacuation, the number of stopping points on evacuation routes, the length of routes, the speed of movement, the time of boarding and disembarking the passengers, the capacity of buses and their number. The criterion for evaluating the efficiency of the routes is the total time of population evacuation, depending on the number of buses on the routes.

Based on the analysis of the location of shelter facilities and transfer stations on the subway line, we established that it is expedient to create seven evacuation routes that ensure the timely evacuation of the population. After assessing the available passenger traffic on city transport routes, we determined the potential demand for evacuation transportation. The analysis of the operational parameters of the routes made it possible to specify the time indicators for the evacuation of the population.

The analysis of the interaction processes resulted in a diagram of the structural contour of the functional connection. The developed analytical models helped to establish several indicators characterising the operation of evacuation bus routes. The developed theoretical foundations are the basis for simulation modelling and setting the regularity of changes in evacuation efficiency assessment indicators depending on the number and capacity of buses.

Based on the real-life conditions, the study determined the need to use two buses on each route to evacuate the population in the district. Such conditions will ensure the transfer of the population to the safe zones within 18.3 to 31.7 hours.

Keywords: *population evacuation, bus, evacuation route, volume of transportation, travel time.*