

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Доценко Олександр Григорович

УДК 614.841.12:539.377

ДИСЕРТАЦІЯ
УДОСКОНАЛЕННЯ РОЗРАХУНКОВОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ
ТРИВАЛОСТІ ЕВАКУАЦІЇ ЛЮДЕЙ В ТОРГОВЕЛЬНО-РОЗВАЖАЛЬНИХ
ЦЕНТРАХ З УРАХУВАННЯМ НАЯВНОСТІ МАЛОМОБІЛЬНИХ ЛЮДЕЙ
РІЗНИХ ГРУП

Спеціальність – 261 «Пожежна безпека»

Галузь знань – 26 «Цивільна безпека»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ О. Г. Доценко

Науковий керівник: **Ковалишин Василь Васильович**
доктор технічних наук, професор

Львів 2024

АНОТАЦІЯ

Доценко О. Г. Удосконалення розрахункового методу визначення тривалості евакуації людей в торговельно-розважальних центрах з урахуванням наявності маломобільних людей різних груп. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 «Пожежна безпека». – Львівський державний університет безпеки життєдіяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій, Львів, 2024.

Зміст анотації.

Актуальність теми дослідження. Евакуація людей з різним рівнем мобільності є важливим аспектом планування та координації дій в умовах надзвичайних ситуацій. Забезпечення ефективної та безпечної евакуації для маломобільних осіб, дітей, літніх людей, а також інших вразливих груп населення вимагає спеціалізованих стратегій та рішень. У сучасному світі, коли ми стикаємося з різноманітними загрозами, від природних катастроф до терористичних актів, ефективна методика евакуації змішаного потоку людей з різним рівнем мобільності є вирішальною для забезпечення безпеки та мінімізації втрат життя.

Забезпечення безпеки шляхом евакуації у випадку пожежі є одним з найважливіших завдань. Але на жаль у цьому контексті, рівень інклюзії поки що лишається дуже низьким порівняно з показниками країн ЄС, що вказує на продовження тенденції активного розвитку у майбутньому. У зв'язку із війною для нашої держави інклюзія як ніколи стала актуальним питанням, тому при її впровадженні виникає немало проблем, це також стосується і заходів із забезпечення пожежної безпеки.

Нині ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення є основним документом з розрахунку часу евакуації, але не містить достатніх вказівок для розрахунків, зважаючи на різні конфігурації потоків людей із перебуванням в них

осіб різних груп мобільності, тоді як у реальних ситуаціях ми маємо справу з різноманітним відсотковим співвідношенням людей різних груп мобільності або немобільних осіб, які не можуть рухатися без допомоги. У документі немає необхідних рекомендацій для таких ситуацій, зокрема для медичних установ та інших об'єктів з масовим перебуванням людей, де присутні немобільні особи.

Отже, дослідження проблематичних аспектів та визначення шляхів забезпечення захисту і підтримки осіб різних груп мобільності, що сприятимуть створенню суспільства з рівними можливостями, є важливим та актуальним завданням для поліпшення якості життя людей.

Ідея роботи полягає в удосконаленні методики розрахунку часу евакуації людей з торговельно-розважальних центрів з урахуванням наявності маломобільних осіб різних груп, у тому числі із змінюваним відсотковим співвідношенням. Дослідження спрямоване на аналіз та розкриття впливу цих факторів на процес евакуації під час пожежі, що дозволить розробити більш точні та ефективні стратегії в разі виникнення надзвичайних ситуацій. Дослідження передбачає експериментальне визначення залежностей між швидкістю руху людського потоку та його щільністю за різних конфігурацій, а також моделювання цих процесів для оптимізації евакуаційних стратегій.

Мета роботи є розкриття закономірностей руху людського потоку в умовах ТРЦ, що складається з людей різних груп мобільності від щільності та відсоткового співвідношення людей маломобільних груп, як наукового підґрунтя удосконалення методики визначення розрахункового часу евакуації людей із приміщень будівель і споруд під час пожежі.

Завдання дослідження:

- проаналізувати поточний розвиток ТРЦ в Україні та за кордоном, ідентифікувати проблеми, пов'язані з нормуванням вимог щодо пожежної безпеки для евакуаційних шляхів та виходів в ТРЦ і розглянути можливі шляхи їх вирішення;
- провести натурні спостереження в реальних умовах ТРЦ, для отримання та аналізування даних щодо поведінки людей під час евакуації, руху

змішаних людських потоків які включали людей груп мобільності М4 та їх рятування із пожежобезпечних зон, пожежно-рятувальними підрозділами;

- дослідити евакуацію людей різних груп мобільності (М1, М3, М4) з метою формування емпіричних баз даних та визначення залежності швидкості змішаного людського потоку від щільності та відсоткового співвідношення учасників груп мобільності М1, М3, М4;

- змодельовати експериментальні дослідження евакуації людей різних груп мобільності М1, М3 та М4 з використанням програмного забезпечення;

- провести чисельний експеримент з метою оцінки впливу щільності (D), частки учасників, що користуються опорами (милицями) (М3), та частки учасників, які пересуваються на візках (М4) на швидкість руху людського потоку та розробити пропозиції щодо удосконалення методики визначення розрахункового часу евакуації людей із приміщень будівель і споруд під час пожежі;

- розробити рекомендації проведення навчальних евакуацій з ТРЦ спрямовані на підвищення ефективності евакуаційного процесу в умовах наявності маломобільних груп населення.

Об'єкт дослідження – процес евакуації під час пожежі змішаного людського потоку, що включає учасників різних груп мобільності з торговельно-розважальних центрів.

Предмет дослідження – удосконалення розрахункового методу визначення тривалості евакуації людей у торговельно-розважальних центрах з урахуванням наявності маломобільних людей різних груп.

Методи дослідження. У дослідженні застосовано комплексний підхід, який включає в себе наступні складові: аналіз і узагальнення сучасних науково-технічних досягнень у сфері вивчення процесів евакуації людей різних груп мобільності із будівель ТРЦ; проведено натурні спостереження за рухом людських потоків для створення статистичної бази даних на основі емпіричних досліджень; використано методи математичної статистики для аналізу результатів натурних спостережень і оцінки ефективності запропонованих організаційно-

технічних заходів; використано спрощені аналітичні, індивідуально-потоків та імітаційно-стохастичні моделі для розрахунку необхідного часу евакуації з будівлі ТРЦ.

Наукова новизна роботи полягає у розкритті особливостей руху змішаного людського потоку в умовах ТРЦ, який включає учасників різних груп мобільності (М1, М3, М4) залежно від щільності потоку та відсоткового співвідношення маломобільних осіб для подальшого удосконалення методики визначення розрахункового часу евакуації з приміщень будівель і споруд під час пожежі. При цьому:

Вперше:

- створено емпіричну базу даних щодо швидкості руху та поведінки людей під час евакуації, що дало можливість розрахувати параметри руху людського потоку необхідні для проведення чисельного експерименту;
- встановлено залежність швидкості змішаного людського потоку від щільності та відсоткового співвідношення учасників груп мобільності М1, М3 та М4:

$$V_{\text{сер}} = 95,47131679 - 83,02423075D_{\text{сер}} - 2,751822156\alpha_{\text{М3}} - 4,64221358\alpha_{\text{М4}} + \\ + 1,576260255D_{\text{сер}}\alpha_{\text{М3}} + 3,63924295D_{\text{сер}}\alpha_{\text{М4}} + 0,529491833\alpha_{\text{М3}}\alpha_{\text{М4}} - \\ - 0,746254255D_{\text{сер}}\alpha_{\text{М3}}\alpha_{\text{М4}}$$

Набуло подальшого розвитку:

- визначення залежностей швидкості змішаного людського потоку від щільності та відсоткового співвідношення учасників різних груп мобільності за допомогою експериментальних та розрахункових методів, що дозволило оцінити динаміку людського потоку під час евакуації та використання комп'ютерного моделювання для збільшення обсягу наявних даних та ефективного оцінювання адекватності проведених експериментальних досліджень;
- вдосконалення методики натурних спостережень в реальних умовах ТРЦ щодо поведінки людей під час евакуації, руху змішаних людських потоків груп мобільності М1 та М4 і рятування груп М4 із пожежобезпечних зон, пожежно-рятувальними підрозділами.

Удосконалено розрахунково-інформаційну базу щодо визначення розрахункового часу евакуації людей різних груп мобільності із приміщень будівель і споруд під час пожежі.

Практичне значення отриманих результатів полягає в удосконаленні розрахункового методу визначення часу евакуації людей різних груп мобільності із приміщень будівель і споруд під час пожежі. На основі проведених досліджень розроблено рекомендації щодо проведення навчальних евакуацій з ТРЦ, спрямовані на підвищення ефективності евакуаційного процесу в умовах наявності маломобільних груп населення.

У **вступі** обґрунтовано важливість обраної теми дослідження, її відношення до наукових робіт, визначено мету та завдання роботи. Сформульовано ідею роботи, об'єкт і предмет досліджень, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів. Також наведено відомості щодо апробації та публікацій результатів дослідження.

У **першому розділі** проаналізовано сучасний стан пожежної безпеки ТРЦ, а також проведено аналіз випадків пожеж як в Україні, так і за її межами. Удосконалення пожежної безпеки в торговельно-розважальних закладах є важливим завданням сучасності. Встановлено, що рівень пожежної безпеки торговельно-розважальних закладів значною мірою залежить від оптимального вибору типу та виду систем протипожежного захисту, зважаючи на те, що сучасні ТРЦ характеризуються великою кількістю відвідувачів і персоналу, складним плануванням та високим пожежним навантаженням. Пожежі в таких об'єктах супроводжуються значними матеріальними збитками та призводять до значних людських втрат.

Проведено аналіз статистики пожеж в ТРЦ яка вказує на необхідність покращення систем безпеки, зокрема через присутність відвідувачів які відносяться до маломобільних груп населення. Зазначено важливість вимог до евакуаційних шляхів та виходів, які мають бути доступними для всіх категорій осіб, включаючи людей з обмеженими можливостями.

Проведені аналітичні дослідження процесів евакуації з ТРЦ та аналіз

потоків людей різних груп мобільності, що вказують на необхідність розуміння та врахування різних рівнів мобільності при проєктуванні та плануванні систем евакуації.

Проаналізовано існуючі програмні комплекси для розрахунку часу евакуації та проведені наукові дослідження які підкреслюють важливість врахування психологічного стану людини та різних факторів, що впливають на процес евакуації. Висвітлено потребу у подальшому дослідженні та розвитку технологій, що сприяють покращенню безпеки та ефективності евакуаційних процесів у ТРЦ.

У **другому розділі** встановлено, що вірне обґрунтування моделей і методів для визначення часу евакуації з ТРЦ є критично важливим у забезпеченні безпеки та захисту в разі надзвичайних ситуацій, таких як пожежі або інші аварійні ситуації. Визначено на яких ключових факторах базується Доцільність використання певних моделей та методів.

Обґрунтовано вибір конкретних моделей і методів відповідно до їх ефективності, точності та здатності адаптуватися до конкретних умов ТРЦ.

Розглянуто та проаналізовано класифікації моделей евакуації та категорії які можуть перетинатися, і конкретна модель евакуації може відповідати кільком категоріям одночасно. Встановлено, що вибір конкретної моделі залежить від цілей дослідження, доступних ресурсів та характеристик конкретної ситуації евакуації.

Визначено які критерії потрібно враховувати для розрахунку безпечної евакуації людей з будівель ТРЦ та інших об'єктів з масовим перебуванням людей.

Вивчено, що наявність осіб з різними групами мобільності значно впливає на параметри швидкості руху людських потоків. Виявлено, що швидкість руху може варіюватись в залежності від складу групи людей та щільності людського потоку, що важливо для планування евакуаційних заходів та безпеки у таких об'єктах.

У **третьому розділі** Представлена методика експериментальних досліджень евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності дала змогу створити емпіричні табличні дані щодо параметрів руху змішаних евакуаційних потоків, а

саме встановити залежності між швидкістю руху учасників евакуації та щільності потоку. Отримані дані були використані в наступних дослідженнях евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності і дозволили встановити залежності швидкості руху від щільності для кожної конфігурації потоку та виведення коефіцієнта адаптації людського потоку до зміни його щільності під час руху з різним відсотковим співвідношенням учасників груп мобільності M1, M3 та M4.

За результатами проведених експериментальних досліджень руху змішаного потоку людей з різними параметрами мобільності (M1, M3, M4) встановлено значний вплив цих параметрів на динаміку евакуаційного процесу. У випадку з параметрами M1 (90 %), M3 (3,33 %) та M4 (6,67 %) зафіксовано середнє відсоткове зниження швидкості потоку на рівні 54,86 %, при одночасному збільшенні середньої щільності потоку на 42,38 %. Середнє значення швидкості потоку становить приблизно 38,28 м/хв. Це вказує на те, що середня швидкість потоку людей у вибірці знаходиться на цьому рівні. Медіана швидкості потоку дорівнює 37,07 м/хв, що означає, що половина значень швидкості потоку менші або рівні 37,07 м/хв, а інша половина більші або рівні цьому значенню. Медіана близька до середнього значення, що свідчить на відносно симетричний розподіл швидкості потоку. Середнє значення щільності потоку становить приблизно $0,38 \text{ м}^2/\text{м}^2$. Це вказує на те, що середня щільність потоку людей у вибірці знаходиться на цьому рівні. Медіана щільності потоку дорівнює $0,35 \text{ м}^2/\text{м}^2$. Медіана є середнім значенням у впорядкованій вибірці, що означає, що половина значень щільності потоку менші або рівні $0,35 \text{ м}^2/\text{м}^2$, а інша половина більші або рівні цьому значенню. Медіана близька до середнього значення, що свідчить на відносно симетричний розподіл щільності потоку.

Для параметрів M1 (90 %), M3 (6,67 %) та M4 (3,33 %) виявлено менше відсоткове зниження швидкості потоку – 32,66 %, з відповідним збільшенням щільності потоку на 39,63 %. Середнє значення швидкості потоку становить приблизно 51,10 м/хв. Це середнє значення всіх даних швидкості потоку, що

вказує на середній рівень швидкості в цій вибірці. Медіана швидкості потоку дорівнює 50,00 м/хв.

Медіана показує, що половина значень швидкості потоку менша або рівна 50,00, м/хв а інша половина більша або рівна цьому значенню. Медіана близька до середнього значення, що свідчить на відносно симетричний розподіл швидкості потоку. Середнє значення щільності потоку становить приблизно $0,34 \text{ м}^2/\text{м}^2$. Це середнє значення всіх даних щільності потоку, що вказує на середній рівень щільності в цій вибірці. Медіана щільності потоку дорівнює $0,35 \text{ м}^2/\text{м}^2$. Медіана показує, що половина значень щільності потоку менша або рівна $0,35 \text{ м}^2/\text{м}^2$, а інша половина більша або рівна цьому значенню. Медіана дуже близька до середнього значення, що свідчить на відносно симетричний розподіл щільності потоку.

У разі М1 (93,33 %), М3 (3,335 %) та М4 (3,335 %) спостерігається середнє відсоткове зниження швидкості потоку на рівні 49,42 %, при середньому відсотковому збільшенні щільності потоку на 41,83 %. Середнє значення швидкості потоку становить приблизно 41,11 м/хв. Це середнє значення всіх даних швидкості потоку, що вказує на середній рівень швидкості в цій вибірці. Медіана швидкості потоку дорівнює 39,52 м/хв. Медіана показує, що половина значень швидкості потоку менша або рівна 39,52 м/хв, а інша половина більша або рівна цьому значенню. Медіана дуже близька до середнього значення, що свідчить на відносно симетричний розподіл швидкості потоку. Середнє значення щільності потоку становить приблизно $0,40 \text{ м}^2/\text{м}^2$. Це середнє значення всіх даних щільності потоку, що вказує на середній рівень щільності в цій вибірці. Медіана щільності потоку дорівнює $0,35 \text{ м}^2/\text{м}^2$. Медіана показує, що половина значень щільності потоку менша або рівна $0,35 \text{ м}^2/\text{м}^2$, а інша половина більша або рівна цьому значенню. Медіана дещо менша за середнє значення, що свідчить на відносно симетричний розподіл щільності потоку. Отримані дані свідчать про необхідність ретельного врахування різноманітних факторів мобільності при розробці стратегій евакуації та управлінні безпекою в умовах масового руху людей.

Проведено експериментальні дослідження евакуації з ТРЦ з перебуванням у ньому осіб груп мобільності М4 та їх рятування пожежно-рятувальними підрозділами за допомогою пожежних ліфтів. Встановлено, що розподіл відвідувачів на території ТРЦ був нерівномірним. Найбільша кількість людей була в продуктових відділах і відділах жіночого одягу. На поведінку більшої частини людей (60 – 70 %) сигнал про небезпеку не вплинув або вплинув незначною мірою. Найбільш ефективно вплинув на початок евакуації персонал ТРЦ. Більшість відвідувачів обрали найближчий вихід для евакуації. Під час вибору напрямку руху відвідувачі не розрізняли виходи за призначенням (евакуаційний або звичайний).

Загальний час евакуації з будівлі склав 10,61 хв. Більша частина загального часу евакуації пішла на те, щоб люди отримали інформацію про пожежу, оцінили ситуацію і прийняли рішення залишити будівлю.

Час евакуації відвідувачів, котрі пересувались на кріслах колісних з пожежобезпечних зон за допомогою пожежно-рятувальних підрозділів, склав 5,55 хв. Загальний час евакуації відвідувачів на кріслах колісних, в який входить час прямування до пожежобезпечної зони, час очікування на пожежно-рятувальні підрозділи та евакуації, склав 9,81 хв.

Наявність великої кількості розмежованих виходів, широких комунікаційних шляхів дало змогу уникнути високих щільностей людських потоків на шляхах евакуації і не перевищувати значення 1 люд/м^2 .

Після порівняння та аналізу відеоматеріалів встановлено, що евакуація відвідувачів, які пересувались на кріслах колісних і які не вагаючись почали прямувати до пожежобезпечних зон одразу після спрацювання сигналу про пожежну небезпеку, було завершено раніше, аніж закінчилася евакуація відвідувачів без особливих потреб.

З огляду на отримані дані можна припустити, що таке ставлення відвідувачів до сигналів про пожежу небезпечне і в реальній ситуації може призвести до трагічних наслідків.

Аналіз евакуації людей з ТРЦ дав змогу зробити висновок, що одним із вирішальних факторів, які впливають на процес евакуації людей, є грамотні дії персоналу.

Також за допомогою проведеного експерименту було відпрацьовано дії персоналу в умовах пожежі.

Перевірено адекватність експериментальних даних шляхом порівняння їх з результатами комп'ютерного моделювання, що підвищує надійність отриманих результатів. Різниця між результатами моделювання та натурного експерименту не перевищує суттєвих значень різниці в часі, що свідчить про адекватність побудованих моделей. Це, своєю чергою, дозволило оцінити правильність проведеного експерименту та розширити межі експериментальних досліджень щодо відтворення процесів евакуації людських потоків, включаючи маломобільні групи населення М1, М3 та М4, без залучення додаткових матеріальних і людських ресурсів та часу.

За результатами чисельного експерименту з використанням математичних моделей виявлено залежність впливу щільності потоку (D), частки учасників, що користуються опорами (М3), та частки учасників, які пересуваються на візках (М4) на швидкість руху людського потоку (V). Залежність швидкості змішаного людського потоку від щільності та відсоткового співвідношення учасників груп мобільності М1, М3 та М4 має вигляд:

$$V_{\text{сер}} = 95,47131679 - 83,02423075D_{\text{сер}} - 2,751822156\alpha_{\text{М3}} - 4,64221358\alpha_{\text{М4}} + \\ + 1,576260255D_{\text{сер}}\alpha_{\text{М3}} + 3,63924295D_{\text{сер}}\alpha_{\text{М4}} + 0,529491833\alpha_{\text{М3}}\alpha_{\text{М4}} - \\ - 0,746254255D_{\text{сер}}\alpha_{\text{М3}}\alpha_{\text{М4}}$$

Обґрунтовано, що результати, отримані в ході кожного окремого експериментального дослідження, є адекватними, оскільки їх відносні та середньоквадратичні відхилення від усереднених даних становлять 0,20 %; 3,26 %; 3,34%; 17,91 %, а критерії Фішера та Стюдента не перевищують критичних значень.

У **четвертому розділі** На основі отриманих у розділі 3 результатів визначено вихідні дані для розрахунку тривалості евакуації з будівлі ТРЦ.

Для розробленої розрахункової схеми евакуації виконано розрахунок тривалості евакуації із застосуванням індивідуально-потокової моделі. Моделювання процесу евакуації із ТРЦ виконано за допомогою програмного комплексу Pathfinder.

За результатами розрахунку визначено, що розрахунковий час евакуації людей від найвіддаленішої точки поверху до виходу з неї складає 587 с (9,7 хв) з урахуванням часу початку евакуації згідно з таблицею А.3 [5]. Наступним етапом моделювання проведено розрахунок тривалості настання небезпечних чинників пожежі та порівняння їх результатів із фактичним часом евакуації.

Із використанням програмного продукту FDS, реалізованого на основі польової моделі, виконано моделювання поширення НЧП в будівлі ТРЦ та встановлено мінімальні значення часу, необхідні для блокування НЧП евакуаційних шляхів і виходів.

Загальні результатами розрахунків часу евакуації людей з ТРЦ у разі пожежі назовні показують, що розрахунковий час евакуації не перевищує необхідний, тобто люди встигають вийти до моменту досягнення небезпечними чинниками пожежі критичних для людини значень.

Розрахунки демонструють, що присутність маломобільних осіб у загальному потоці суттєво знижує швидкість евакуації. Це зумовлено тим, що маломобільні особи потребують значно більше часу на переміщення, що відповідно призводить до збільшення загальної тривалості евакуації. Незважаючи на те, що додаткові заходи, такі як поліпшення інфраструктури, спеціальні евакуаційні засоби та підвищення рівня підготовки персоналу, можуть допомогти зменшити час евакуації, відсоток маломобільних осіб все одно буде мати значний вплив на швидкість руху потоку. Таким чином, при розробці та плануванні евакуаційних стратегій необхідно обов'язково враховувати відсоткове співвідношення маломобільних осіб у загальному потоці, щоб забезпечити ефективну та безпечну евакуацію для всіх груп населення.

У п'ятому розділі розкрито, що для мінімізації початкового часу евакуації з ТРЦ необхідно впроваджувати комплексні заходи, спрямовані на вдосконалення організації та планування евакуаційного процесу. Одним із ключових рішень є оптимізація евакуаційних маршрутів та використання сучасних автоматизованих систем оповіщення, які забезпечують своєчасне інформування відвідувачів про необхідність негайної евакуації. Крім того, важливим аспектом є забезпечення достатньої кількості та ширини евакуаційних виходів, що дозволяє уникнути заторів і забезпечити безперешкодний рух потоку людей.

Впровадження регулярних навчань з евакуації є ефективним засобом підвищення готовності відвідувачів та персоналу до надзвичайних ситуацій. Навчання дозволяють учасникам набувати практичних навичок і знань, необхідних для швидкого та скоординованого виконання евакуаційних заходів. Особлива увага під час навчань повинна приділятися маломобільним групам населення, оскільки їхня присутність значно впливає на швидкість евакуації. Залучення маломобільних осіб до навчань дозволяє виявити та усунути можливі проблеми, що можуть виникнути під час їхньої евакуації, а також розробити індивідуальні плани евакуації для цієї категорії відвідувачів.

Рекомендації щодо проведення навчальних евакуацій з ТРЦ для підвищення ефективності евакуаційного процесу в умовах наявності маломобільних груп населення включають наступні ключові аспекти. По-перше, навчання повинні проводитися регулярно, не менше двох разів на рік, з участю всіх категорій відвідувачів та персоналу. По-друге, необхідно забезпечити детальне інформування всіх учасників про плани евакуації, маршрути та правила поведінки у надзвичайних ситуаціях. По-третє, слід враховувати особливі потреби маломобільних осіб, розробляти для них індивідуальні плани евакуації та забезпечувати наявність спеціалізованих засобів для їхнього переміщення. По-четверте, важливо забезпечити координацію з представниками екстрених служб для ефективної взаємодії у разі реальної надзвичайної ситуації. По-п'яте, після кожного навчання необхідно проводити детальний аналіз дій усіх учасників, виявляти недоліки та вносити корективи до планів евакуації.

Таким чином, впровадження регулярних навчань з евакуації сприяє підвищенню готовності ТРЦ до надзвичайних ситуацій, забезпечує безпеку відвідувачів та персоналу, а також мінімізує початковий час евакуації, що є критичним фактором у збереженні життя та здоров'я людей.

Ключові слова: пожежна безпека, торговельно розважальний центр, маломобільні групи населення, люди з інвалідністю, евакуація, рятування людей, поведінка людей під час пожежі, інклюзивність, пожежа в торговельно розважальному центрі, комп'ютерне моделювання, група мобільності, евакуаційний потік, час евакуації, небезпечні чинники пожежі, розрахунковий метод.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях

1. Тесленко О. М., Цимбалістий С. З., Кравченко Н. В., **Доценко О. Г.**, Крикун О. М. Аналіз існуючих програмних комплексів для розрахунку часу евакуації людей під час пожежі. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2019. № 1 (7). С. 33–39. DOI: <https://doi.org/10.33269/nvcz.2019.1.33-39>.

2. Ковалишин В. В., **Доценко О. Г.**, Хлевой О. В., Дивень В. І. Дослідження евакуації людей різних груп мобільності з торговельно-розважального центру. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 2 (14). С. 99–107. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2\(14\).99-107](https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2(14).99-107). (індексується в *Index Copernicus International*).

3. **Доценко О.** Методика експериментальних досліджень евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності. *Комунальне господарство міст*. 2023. 6, 180 (Груд. 2023), С. 54–159. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-6-180-154-159>. (індексується в *Index Copernicus International*).

4. Ковалишин В. В., **Доценко О. Г.**, Хлевой О. В., Дивень В. І., Борисова

A.C. Experimental research simulation on evacuation of mixed flows consisting of different mobility groups. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. 2023. Том. 7 № 2. С. 89–99. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.2.89.99>.

5. Borysova A., **Dotsenko O.**, Ensuring fire safety and evacuation of population groups with low mobility from shopping and entertainment centers: challenges and prospects. *The scientific heritage* No 135 (2024), С. 51–53. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11044740>.

Публікації у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази «Scopus»

6. Khlevnoi, O., **Dotsenko, O.**, Kovalyshyn, V., Parkhomenko, V.-P., Dyven, V., Borysova, A., Vovk, S. (2024). Improvement of the methodology for determining the movement parameters of individuals with visual impairments during evacuation from higher education institutions with inclusive education using a simplified analytical model. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (3 (128)), С. 60–69. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.302950>.

Публікації, які засвідчують апробацію дисертації

7. Ковалишин В. В., **Доценко О. Г.**, Хлевой О. В. Дослідження евакуації людей з обмеженою мобільністю із торговельно-розважального центру. *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: Всеукр. наук.-практ. конф., з міжнародною участю*. м. Львів, 12-13 жовт. 2022. Львів, 2022. С. 43-46.

8. **Доценко О. Г.**, Ковалишин В. В. Дослідження процесів евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності за допомогою комп'ютерного моделювання. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених, курсантів та*

студентів. м. Львів, 28-29 бер. 2024. Львів, 2024. С. 169-173.

9. **Доценко О. Г.**, Борисова А.С., Помазанова Т.І. Критерії впливу та закономірності зміни параметрів швидкості руху людських потоків від наявності різних груп мобільності в торговельно-розважальних центрах. *Problems of Emergency Situations*: Міжнар. наук.-практ. конф. м. Харків, 16 трав. 2024. Львів, 2024. С. 28-29.

10. **Доценко О. Г.**, Дишкант О. В. Залежність евакуаційної швидкості руху людських потоків від перебування в них осіб, що пересуваються на кріслах колісних. *Innovations and prospects of world science: proceedings of XII International Scientific and Practical Conference*. Vancouver, 20-22 лип., Vancouver, 2022. С. 114-117.

11. Дишкант О. В., Дивень В.І., **Доценко О. Г.**, Савченко О.В. Чинники, які впливають на швидкість евакуації. *Moderní aspekty vědy. Svazek XXII mezinárodní kolektivní monografie. Česká republika*. 2022 С. 516-526.

12. **Доценко О. Г.**, Тесленко О. М., Цимбалістий С. З., Крикун О. М. Створення комплексного механізму прийняття управлінських рішень для оцінки пожежного ризику на об'єктах з масовим перебуванням людей. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист*: матеріали Х Всеук. наук.-практ. конф. з міжн. уч. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 29-30 жовт. 2020. С. 96-98.

13. **Доценко О. Г.**, Бабенко Д. М., Луценко Ю. В., Дивень В. І. Дослідження евакуації та рятування людей з обмеженою мобільністю із торговельного центру пожежно-рятувальними підрозділами. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист*: матеріали XII Всеукр. наук.-практ. конф., з міжнародною участю. м. Черкаси, 27-28 жовт. 2022. Черкаси, 2022. С. 21-23.

14. **Доценко О. Г.**, Цимбалістий С. З., Крикун О. М. Дослідження евакуації маломобільних груп населення в умовах змішаних потоків. *Theoretical and empirical scientific research: concept and trends*. VI International Scientific and Practical Conference, 2 лют., 2024; Oxford, UK, 2024. С. 149-152.

15. Burak N., Khlevnoi O., Zhezlo-Khlevna N., Raita D., **Dotsenko O.**

Improving of simplified analytical model for calculating the evacuation duration in higher education institutions with inclusive groups using machine learning methods. *Intelligent systems of decision-making and problems of computational intelligence. XX international scientific internet conference*, June 20-23, 2024, Khmelnytskyi, Ukraine, Usti nad Labem, Czech Republic 2024. P. 23-25.

16. І.О. Васильєв, І.В. Бабійчук, К.Г. Белікова, **О.Г. Доценко**, В.М. Михайлов, В.В. Ніжник, А.В. Пруський, С.П. Потеряйко, Н.М. Романюк, О.М. Тесленко, В.О. Тищенко. Навчально-методичний посібник «Управління оповіщенням та евакуацією людей з будинків і споруд під час пожежі. – Київ: Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, 2022. – 474 с.

SUMMARY

Dotsenko O. G. Improvement of the calculation method for determining the duration of evacuation of people in shopping and entertainment centers taking into account the presence of people with reduced mobility of different groups. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the Doctor of Philosophy degree in specialty 261 "Fire Safety". – Lviv State University of Life Safety of the State Emergency Service of Ukraine, Lviv, 2024.

Abstract content.

Relevance of the research topic.

Evacuating people with different mobility levels is an important aspect of emergency planning and coordination. Ensuring effective and safe evacuation for people with reduced mobility, children, the elderly, and other vulnerable groups requires specialised strategies and solutions. In today's world, when we face a variety of threats, from natural disasters to terrorist attacks, an effective methodology for evacuating a mixed flow of people with different levels of mobility is crucial to ensuring safety and minimising loss of life.

Ensuring safety through evacuation in the event of a fire is one of the most important tasks. But unfortunately, in this context, the level of inclusion is still very low compared to EU countries, which indicates that the trend of active development will continue in the future. Due to the war, inclusion has become a pressing issue for our country as never before, so its implementation raises many problems, including fire safety measures.

Currently, DSTU 8828:2019 Fire safety. General Provisions is the main document for calculating evacuation times, but it does not contain sufficient guidance for calculations, given the different configurations of people flows with people of different mobility groups in them, while in real situations we are dealing with a different percentage of people of different mobility groups or non-mobile people who cannot move without assistance. The document does not contain the necessary

recommendations for such situations, in particular for medical institutions and other facilities with a large number of people where there are people with limited mobility.

Thus, researching problematic aspects and identifying ways to ensure protection and support for people with different mobility groups, which will contribute to the creation of a society with equal opportunities, is an important and urgent task for improving the quality of life.

The idea of the work is to improve the methodology for calculating the time for evacuating people from shopping malls, taking into account the presence of people with limited mobility of different groups, including those with a variable percentage. The study is aimed at analysing and revealing the impact of these factors on the evacuation process during a fire, which will allow for the development of more accurate and effective strategies in the event of an emergency. The study involves the experimental determination of the dependencies between the speed of the human flow and its density in different configurations, as well as the modelling of these processes to optimise evacuation strategies.

The purpose of the work is to reveal the regularities of human flow in a shopping mall consisting of people of different mobility groups, depending on the density and percentage of people with low mobility, as a scientific basis for improving the methodology for determining the estimated time for evacuating people from the premises of buildings and structures in case of fire.

Objectives of the study:

- to analyse the current development of shopping malls in Ukraine and abroad, identify problems related to the regulation of fire safety requirements for evacuation routes and exits in shopping malls and consider possible ways to solve them;
- to conduct field observations in real conditions of the shopping mall to obtain and analyse data on the behaviour of people during evacuation, the movement of mixed human flows, including people of M4 mobility groups and their rescue from fire-safe zones by fire and rescue units;
- to study the evacuation of people of different mobility groups (M1, M3, M4) in order to form empirical databases and determine the dependence of the speed of the

mixed human flow on the density and percentage of participants of mobility groups M1, M3, M4;

- - to simulate experimental studies of evacuation of people of different mobility groups M1, M3 and M4 using software;
- to conduct a numerical experiment to assess the impact of density (D), the proportion of participants using supports (crutches) (M3), and the proportion of participants using wheelchairs (M4) on the speed of the human flow and develop proposals for improving the methodology for determining the estimated time for evacuating people from the premises of buildings and structures in case of fire;
- to develop recommendations for conducting training evacuations from shopping malls aimed at improving the efficiency of the evacuation process in the presence of people with limited mobility.

The object of the study is the process of evacuation during a fire of a mixed human flow, including participants of different mobility groups from shopping and entertainment centres.

The subject of the study is to improve the calculation method for determining the duration of evacuation of people in shopping and entertainment centres, taking into account the presence of people with limited mobility of different groups.

Research methods. The study applies an integrated approach that includes the following components: analysis and synthesis of modern scientific and technical achievements in the field of studying the processes of evacuation of people of different mobility groups from shopping malls; field observations of the movement of human flows were carried out to create a statistical database based on empirical research; methods of mathematical statistics were used to analyse the results of field observations and assess the effectiveness of the proposed organisational and technical measures; simplified analytical, individual-flow and simulation-stochastic models were used to calculate the required evacuation time from the mall building.

The scientific novelty of the work consists in revealing the peculiarities of the movement of a mixed human flow in the conditions of the mall, which includes participants of different mobility groups (M1, M3, M4) depending on the density of the

flow and the percentage ratio of persons with limited mobility for further improvement of the methodology for determining the estimated time of evacuation from the premises of buildings and structures during a fire. At the same time:

For the first time:

- an empirical database was created on the speed of movement and behavior of people during evacuation, which made it possible to calculate the parameters of the movement of the human flow necessary for conducting a numerical experiment;
- the dependence of the speed of the mixed human flow on the density and percentage ratio of participants of mobility groups M1, M3 and M4 was established:

$$V_{\text{avg}} = 95,47131679 - 83,02423075D_{\text{avg}} - 2,751822156\alpha_{M3} - 4,64221358\alpha_{M4} + \\ + 1,576260255D_{\text{avg}}\alpha_{M3} + 3,63924295D_{\text{avg}}\alpha_{M4} + 0,529491833\alpha_{M3}\alpha_{M4} - \\ - 0,746254255D_{\text{avg}}\alpha_{M3}\alpha_{M4}$$

Further development took place:

- determination of the dependence of the speed of the mixed human flow on the density and the percentage ratio of participants of different mobility groups using experimental and computational methods, which made it possible to improve the assessment of the dynamics of the human flow during evacuation and the use of computer modeling to increase the amount of available data and effectively assess the adequacy of the conducted experimental research;
- to improve the method of live observations in the real conditions of shopping malls, to obtain and analyze data on the behavior of people during evacuation, the movement of mixed human flows that included people of the M4 mobility groups and their rescue from fire safety zones, by fire and rescue units.

The work improved the calculation and information base for determining the estimated time of evacuation of people of different mobility groups from the premises of buildings and structures during a fire.

The practical significance of the obtained results lies in the improvement of the calculation method for determining the evacuation time of people of different mobility groups from the premises of buildings and structures during a fire. On the basis of the conducted research, recommendations have been developed for training evacuations

from shopping malls, aimed at increasing the efficiency of the evacuation process in the presence of low-mobility population groups.

The introduction substantiates the importance of the chosen research topic, its relation to scientific works, and defines the purpose and tasks of the work. The idea of the work, object and subject of research, scientific novelty and practical significance of the obtained results are formulated. Information on approval and publication of research results is also provided.

In the first chapter, the current state of fire safety in trade and entertainment establishments is analyzed, and fire incidents in Ukraine and abroad are also analyzed. Improving fire safety in shopping and entertainment establishments is an important task of modern times. It was established that the level of fire safety of shopping and entertainment establishments largely depends on the optimal choice of the type and type of fire protection systems, taking into account the fact that modern shopping and entertainment centers are characterized by a large number of visitors and personnel, complex planning and high fire load. Fires in such objects are accompanied by significant material damage and lead to significant human losses.

An analysis of the statistics of fires in shopping malls was carried out, which indicates the need to improve security systems, in particular due to the presence of visitors who belong to low-mobility population groups. The importance of requirements for evacuation routes and exits, which should be accessible to all categories of persons, including people with disabilities, is noted.

Analytical studies of evacuation processes from shopping malls and analysis of flows of people of different mobility groups were carried out, indicating the need to understand and take into account different levels of mobility when designing and planning evacuation systems.

The existing software complexes for calculating the evacuation time were analyzed and scientific studies were conducted that emphasize the importance of taking into account the psychological state of a person and various factors affecting the evacuation process. The need for further research and development of technologies

contributing to the improvement of safety and efficiency of evacuation processes in shopping malls is highlighted.

In the second chapter, it is established that the correct justification of models and methods for determining the time of evacuation from the shopping center is critical in ensuring safety and protection in case of emergency situations, such as fires or other emergency situations. It was determined on which key factors the feasibility of using certain models and methods is based.

The choice of specific models and methods is substantiated in accordance with their efficiency, accuracy and ability to adapt to the specific conditions of the shopping and entertainment center.

The classifications of evacuation models and categories that may overlap are reviewed and analyzed, and a particular evacuation model may correspond to several categories at the same time. It was established that the choice of a specific model depends on the research objectives, available resources and characteristics of a specific evacuation situation.

It has been determined which criteria must be taken into account in order to calculate the safe evacuation of people from shopping center buildings and other objects with a mass presence of people.

It has been studied that the presence of persons with different mobility groups significantly affects the parameters of the speed of movement of human flows. It was found that the speed of movement can vary depending on the composition of the group of people and the density of the human flow, which is important for planning evacuation measures and safety in such facilities.

In the third chapter, the method of experimental studies of the evacuation of mixed flows of people of different mobility groups was presented. It made it possible to create empirical tabular data on the parameters of the movement of mixed evacuation flows, namely to establish the dependence between the speed of movement of the evacuation participants and the density of the flow. The obtained data were used in subsequent studies of the evacuation of mixed flows of people of different mobility groups and made it possible to establish the dependence of movement speed on density

for each flow configuration and to derive the adaptation coefficient of the human flow to changes in its density during movement with different percentage ratios of participants of mobility groups M1, M3 and M4.

According to the results of experimental studies of the movement of a mixed flow of people with different mobility parameters (M1, M3, M4), a significant influence of these parameters on the dynamics of the evacuation process was established. In the case of parameters M1 (90 %), M3 (3,33 %) and M4 (6,67 %), an average percentage decrease in the flow rate was recorded at the level of 54,86 %, with a simultaneous increase in the average flow density by 42,38 %. The average flow velocity is approximately 38.28 m/min. This indicates that the average flow rate of people in the sample is at this level. The median stream velocity is 37,07 m/min, which means that half of the stream velocity values are less than or equal to 37,07 m/min, and the other half are greater than or equal to this value. The median is close to the mean value, which indicates a relatively symmetrical distribution of the flow speed. The average value of the flux density is approximately $0,38 \text{ m}^2/\text{m}^2$. This indicates that the average density of the flow of people in the sample is at this level. The median flow density is $0,35 \text{ m}^2/\text{m}^2$. The median is the average value in the ordered sample, meaning that half of the flux density values are less than or equal to $0,35 \text{ m}^2/\text{m}^2$ and the other half are greater than or equal to this value. The median is close to the average value, which indicates a relatively symmetrical distribution of the flow density.

For parameters M1 (90 %), M3 (6,67 %) and M4 (3,33 %), a smaller percentage decrease in flow rate was found – 32,66 %, with a corresponding increase in flow density by 39,63 %. The average value of the flow velocity is approximately 51,10 m/min. This is the average of all flow rate data, indicating the average rate level in that sample. The median flow speed is 50,00 m/min.

The median shows that half of the flow rate values are less than or equal to 50,00 m/min and the other half are greater than or equal to this value. The median is close to the mean value, which indicates a relatively symmetrical distribution of the flow velocity. The average value of the flux density is approximately $0,34 \text{ m}^2/\text{m}^2$. This is the average of all stream density data, indicating the average level of density in that

sample. The median flow density is $0,35 \text{ m}^2/\text{m}^2$. The median shows that half of the flux density values are less than or equal to $0,35 \text{ m}^2/\text{m}^2$ and the other half are greater than or equal to this value. The median is very close to the mean value, which indicates a relatively symmetrical distribution of the flow density.

In the case of M1 (93,33 %), M3 (3,335 %) and M4 (3,335 %), there is an average percentage decrease in the flow rate at the level of 49,42 %, with an average percentage increase in the flow density by 41,83 %. The average flow velocity is approximately 41,11 m/min. This is the average of all flow rate data, indicating the average rate level in that sample. The median flow speed is 39,52 m/min. The median shows that half of the flow velocity values are less than or equal to 39,52 m/min, and the other half are greater than or equal to this value. The median is very close to the mean value, which indicates a relatively symmetrical distribution of the flow velocity. The average value of the flux density is approximately $0,40 \text{ m}^2/\text{m}^2$. This is the average of all stream density data, indicating the average level of density in that sample. The median flow density is $0,35 \text{ m}^2/\text{m}^2$. The median shows that half of the flux density values are less than or equal to $0,35 \text{ m}^2/\text{m}^2$ and the other half are greater than or equal to this value. The median is slightly smaller than the average value, which indicates a relatively symmetrical distribution of the flow density. The obtained data indicate the need to carefully consider various mobility factors when developing evacuation strategies and managing security in conditions of mass movement of people.

Experimental studies of evacuation from the shopping center with persons of M4 mobility groups and their rescue by fire and rescue units with the help of fire elevators were conducted. It was established that the distribution of visitors on the territory of the shopping center was uneven. The largest number of people were in the grocery and women's clothing departments. The behavior of the majority of people (60–70 %) was not affected by the danger signal or was affected to a small extent. The staff of the mall had the most effective effect on the start of the evacuation. Most visitors chose the nearest exit for evacuation. When choosing the direction of movement, visitors did not distinguish exits according to their purpose (evacuation or normal).

The total evacuation time from the building was 10,61 min. Most of the total evacuation time was spent on people receiving information about the fire, assessing the situation and making the decision to leave the building.

The evacuation time of visitors who moved in wheelchairs from fire-safe zones with the help of fire-rescue units was 5,55 min. The total evacuation time of visitors in wheelchairs, which includes the time of going to the fire safety zone, waiting time for fire and rescue units and evacuation, was 9,81 min.

The presence of a large number of demarcated exits and wide communication routes made it possible to avoid high densities of human flows on evacuation routes and not to exceed the value of 1 person/m².

After comparing and analyzing the video footage, it was established that the evacuation of visitors who were in wheelchairs and who did not hesitate to go to the fire-safe zones immediately after the fire alarm was triggered, was completed earlier than the evacuation of visitors without special needs.

Based on the obtained data, it can be assumed that this attitude of visitors to fire alarms is dangerous and in a real situation can lead to tragic consequences.

The analysis of the evacuation of people from the shopping center made it possible to conclude that one of the decisive factors affecting the process of evacuation of people is the competent actions of the staff.

Also, with the help of the conducted experiment, the actions of the personnel in fire conditions were worked out.

The adequacy of the experimental data was checked by comparing them with the results of computer simulation, which increases the reliability of the obtained results. The difference between the results of the simulation and the real experiment does not exceed the significant values of the difference in time, which indicates the adequacy of the constructed models. This, in turn, made it possible to assess the correctness of the conducted experiment and expand the limits of experimental research on the reproduction of evacuation processes of human flows, including low-mobility population groups M1, M3 and M4, without involving additional material and human resources and time.

According to the results of a numerical experiment using mathematical models, the dependence of the influence of flow density (D), the share of participants using supports (M3), and the share of participants moving in wheelchairs (M4) on the speed of the human flow was revealed. The dependence of the speed of the mixed human flow on the density and percentage ratio of the participants of mobility groups M1, M3 and M4:

$$V_{\text{avg}} = 95,47131679 - 83,02423075D_{\text{avg}} - 2,751822156\alpha_{M3} - 4,64221358\alpha_{M4} + \\ + 1,576260255D_{\text{avg}}\alpha_{M3} + 3,63924295D_{\text{avg}}\alpha_{M4} + 0,529491833\alpha_{M3}\alpha_{M4} - \\ - 0,746254255D_{\text{avg}}\alpha_{M3}\alpha_{M4}$$

It is substantiated that the results obtained during each individual experimental study are adequate, as their relative and root mean square deviations from the averaged data are 0,20 %; 3,26 %; 3,34 %; 17,91 %, and Fisher's and Student's tests do not exceed critical values.

In the fourth chapter, based on the results obtained in chapter 3, the initial data for calculating the duration of evacuation from the shopping mall building are defined.

For the developed calculation scheme of evacuation, the duration of evacuation was calculated using the individual flow model. Simulation of the evacuation process from the shopping center was performed using the Pathfinder software complex.

Based on the results of the calculation, it was determined that the estimated time for evacuation of people from the farthest point of the floor to the exit from it is 587 s (9,7 min.) taking into account the time of the start of evacuation according to table A.3 [5]. The next stage of modeling was the calculation of the duration of the occurrence of dangerous fire factors and the comparison of their results with the actual evacuation time.

With the use of the FDS software product implemented on the basis of a field model, the simulation of the distribution of emergency vehicles in the shopping center building was performed and the minimum time values necessary for blocking evacuation routes and exits by emergency vehicles were established.

The general results of the calculations of the evacuation time of people from the mall in the event of a fire show that the estimated evacuation time does not exceed the

required one, that is, people manage to get out before the dangerous factors of the fire reach critical values for people.

Calculations show that the presence of persons with reduced mobility in the general flow significantly reduces the evacuation speed. This is due to the fact that people with limited mobility need much more time to move, which, accordingly, leads to an increase in the total duration of evacuation. Although additional measures such as infrastructure improvements, special evacuation equipment, and increased staff training can help reduce evacuation times, the percentage of people with reduced mobility will still have a significant impact on flow rates. Thus, when developing and planning evacuation strategies, it is necessary to take into account the percentage of persons with limited mobility in the general flow, in order to ensure effective and safe evacuation for all population groups.

In the fifth chapter, it is revealed that in order to minimize the initial time of evacuation from the shopping center, it is necessary to implement comprehensive measures aimed at improving the organization and planning of the evacuation process. One of the key solutions is the optimization of evacuation routes and the use of modern automated notification systems that provide timely information to visitors about the need for immediate evacuation. In addition, an important aspect is the provision of a sufficient number and width of evacuation exits, which allows to avoid traffic jams and ensure the unhindered movement of the flow of people.

Implementing regular evacuation drills is an effective means of increasing the preparedness of visitors and staff for emergency situations. Training allows participants to acquire practical skills and knowledge necessary for quick and coordinated execution of evacuation measures. Special attention during exercises should be paid to the less mobile population groups, as their presence significantly affects the speed of evacuation. Involving people with limited mobility in the exercises allows you to identify and eliminate possible problems that may arise during their evacuation, as well as to develop individual evacuation plans for this category of visitors.

Recommendations for conducting training evacuations from shopping malls to increase the efficiency of the evacuation process in the presence of low-mobility

population groups include the following key aspects. First, training should be held regularly, at least twice a year, with the participation of all categories of visitors and staff. Secondly, it is necessary to provide detailed information to all participants about evacuation plans, routes and rules of behavior in emergency situations. Thirdly, the special needs of persons with limited mobility should be taken into account, individual evacuation plans should be developed for them, and specialized means for their movement should be provided. Fourth, it is important to ensure coordination with emergency services representatives for effective interaction in the event of a real emergency. Fifth, after each exercise, it is necessary to conduct a detailed analysis of the actions of all participants, identify shortcomings and make adjustments to the evacuation plans.

Thus, the implementation of regular evacuation drills helps increase the preparedness of shopping malls for emergency situations, ensures the safety of visitors and staff, and also minimizes the initial evacuation time, which is a critical factor in preserving people's lives and health.

Key words: fire safety, shopping and entertainment center, low-mobility population groups, people with disabilities, evacuation, rescuing people, people's behavior during a fire, inclusiveness, fire in a shopping and entertainment center, computer simulation, mobility group, evacuation flow, evacuation time, dangerous fire factors, calculation method.

LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE THEME OF THE DISSERTATION

Articles in scientific and professional publications

1. Teslenko, O. M., Tsymbalistyi, S. Z., Kravchenko, N. V., **Dotsenko, O. G.**, Krykun, O. M. (2019). Analysis of existing software packages for calculating evacuation time during a fire. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, 1(7), P. 33–39. DOI: <https://doi.org/10.33269/nvcz.2019.1.33-39> [in Ukrainian].
2. Kovalyshyn, V. V., **Dotsenko, O. G.**, Khlevnoy, O. V., Dyven, V. I. (2022). Study of the evacuation of people of different mobility groups from a shopping

and entertainment center. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, 2(14), P. 99–107. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2\(14\).99-107](https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2(14).99-107). (Indexed in Index Copernicus International) [in Ukrainian].

3. **Dotsenko, O.** (2023). Methodology of experimental research on the evacuation of mixed flows of people of different mobility groups. *Municipal Economy of Cities*, 6(180), P. 54–159. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-6-180-154-159>. (Indexed in Index Copernicus International) [in Ukrainian].

4. Kovalyshyn, V. V., **Dotsenko, O. G.**, Khlevnoy, O. V., Dyven, V. I., Borysova, A. S. (2023). Experimental research simulation on evacuation of mixed flows consisting of different mobility groups. *Collection of Scientific Works of the Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Protection of Ukraine "Emergencies: Prevention and Elimination"*, 7(2), P. 89–99. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.2.89.99> [in English].

5. Borysova, A., **Dotsenko, O.** (2024). Ensuring fire safety and evacuation of population groups with low mobility from shopping and entertainment centers: challenges and prospects. *The Scientific Heritage*, 135, P. 51–53. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11044740> [in English].

Articles in the issues included in the international scientometric database "Scopus"

6. Khlevnoi, O., **Dotsenko, O.**, Kovalyshyn, V., Parkhomenko, V.-P., Dyven, V., Borysova, A., Vovk, S. (2024). Improvement of the methodology for determining the movement parameters of individuals with visual impairments during evacuation from higher education institutions with inclusive education using a simplified analytical model. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (3 (128)), P. 60–69. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.302950> [in English].

List of articles that certify the approval of the dissertation

7. Kovalyshyn, V. V., **Dotsenko, O. G.**, Khlevnoi, O. V. (2022). Study of the evacuation of people with limited mobility from a shopping and entertainment center. *Current Issues of Fire Safety and Prevention of Emergencies in Modern Conditions:*

All-Ukrainian Scientific and Practical Conference with International Participation, Lviv, October 12-13, 2022. Lviv, 2022, P. 43-46 [in Ukrainian].

8. **Dotsenko, O. G.**, Kovalyshyn, V. V. (2024). Study of the evacuation processes of mixed flows of people of different mobility groups using computer modeling. Problems and Prospects for the Development of the Life Safety System: International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Cadets, and Students, Lviv, March 28-29, 2024. Lviv, 2024, P. 169-173 [in Ukrainian].

9. **Dotsenko, O. G.**, Borysova, A. S., Pomazanova, T. I. (2024). Criteria of influence and patterns of change in the speed parameters of human flows depending on the presence of different mobility groups in shopping and entertainment centers. Problems of Emergency Situations: International Scientific and Practical Conference, Kharkiv, May 16, 2024. Lviv, 2024, P. 28-29 [in Ukrainian].

10. **Dotsenko, O. G.**, Dyshkant, O. V. (2022). Dependence of evacuation speed of human flows on the presence of individuals using wheelchairs. Innovations and Prospects of World Science: Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference, Vancouver, July 20-22, 2022. Vancouver, 2022, P. 114-117 [in Ukrainian].

11. Dyshkant, O. V., Dyven, V. I., **Dotsenko, O. G.**, Savchenko, O. V. (2022). Factors affecting evacuation speed. Moderní Aspekty Vědy. Svazek XXII Mezinárodní Kolektivní Monografie, Czech Republic, 2022, P. 516-526 [in Ukrainian].

12. **Dotsenko, O. G.**, Teslenko, O. M., Tsymbalistyi, S. Z., Krykun, O. M. (2020). Creation of a comprehensive decision-making mechanism for assessing fire risk in facilities with mass gatherings. Emergencies: Safety and Protection: Proceedings of the X All-Ukrainian Scientific and Practical Conference with International Participation, Cherkasy: ChIPB named after the Heroes of Chernobyl NUCD of Ukraine, October 29-30, 2020, P. 96-98 [in Ukrainian].

13. **Dotsenko, O. G.**, Babenko, D. M., Lutsenko, Y. V., Dyven, V. I. (2022). Study of the evacuation and rescue of people with limited mobility from a shopping center by fire and rescue units. Emergencies: Safety and Protection: Proceedings of the

XII All-Ukrainian Scientific and Practical Conference with International Participation, Cherkasy, October 27-28, 2022. Cherkasy, 2022, P. 21-23 [in Ukrainian].

14. **Dotsenko, O. G.**, Tsymbalistyi, S. Z., Krykun, O. M. (2024). Study of the evacuation of low-mobility population groups in mixed flows. Theoretical and Empirical Scientific Research: Concept and Trends. VI International Scientific and Practical Conference, February 2, 2024; Oxford, UK, 2024, P. 149-152 [in Ukrainian].

15. Burak N., Khlevnoi O., Zhezlo-Khlevna N., Raita D., **Dotsenko O.** (2024). Improving of simplified analytical model for calculating the evacuation duration in higher education institutions with inclusive groups using machine learning methods. *Intelligent systems of decision-making and problems of computational intelligence*. XX international scientific internet conference, June 20-23, 2024, Khmelnytskyi, Ukraine, Usti nad Labem, Czech Republic 2024. P. 23-25 [in English].

16. Vasilyev, I. O., Babyichuk, I. V., Bielikova, K. G., **Dotsenko, O. G.**, Mykhailov, V. M., Nizhnik, V. V., Pruskyi, A. V., Poteryayko, S. P., Romaniuk, N. M., Teslenko, O. M., Tyshchenko, V. O. (2022). Training Manual “Management of Notification and Evacuation of People from Buildings and Structures during a Fire”. Kyiv: Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, 2022, 474 p [in Ukrainian].

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ.....	36
ВСТУП.....	37
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ І ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ ТА ЕВАКУАЦІЇ В ТОРГОВЕЛЬНО-РОЗВАЖАЛЬНИХ ЦЕНТРАХ	45
1.1 Аналіз досліджень поточного стану заходів пожежної безпеки в торговельно- розважальних центрах.....	45
1.2 Аналіз статистики пожеж в торговельно-розважальних центрах	54
1.3 Дослідження процесів евакуації з торговельно-розважальних центрів	58
1.3.1 Аналіз досліджень евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності.....	59
1.3.2 Аналіз існуючих програмних комплексів для розрахунку часу евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності та проведених наукових досліджень.....	63
1.4. Висновки за розділом.....	75
РОЗДІЛ 2 ОБГРУНТУВАННЯ МОДЕЛЕЙ І МЕТОДІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ЕВАКУАЦІЇ ІЗ ТОРГОВЕЛЬНО-РОЗВАЖАЛЬНИХ ЦЕНТРІВ.....	77
2.1 Моделі і методи для визначення часу евакуації із торговельно-розважальних центрів	77
2.1.1 Класифікація моделей евакуації людей у разі пожежі	77
2.1.2 Обґрунтування вибору моделі для проведення розрахунків.....	80
2.1.3 Математична модель процесу руху потоків із маломобільними людьми різних груп	89
2.2 Встановлення критеріїв, що впливають на параметри руху змішаних потоків людей при евакуації з торговельно-розважального центру.....	94
2.3 Визначення закономірності зміни параметрів швидкості руху людських потоків від наявності людей різних груп мобільності в торговельно-розважальних центрах.....	102
2.4 Висновки за розділом.....	105

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕВАКУАЦІЇ ЗМІШАНИХ ПОТОКІВ ЛЮДЕЙ РІЗНИХ ГРУП МОБІЛЬНОСТІ В ТОРГОВЕЛЬНО-РОЗВАЖАЛЬНОМУ ЦЕНТРІ	111
3.1 Методика експериментальних досліджень евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності М1, М3 та М4.....	111
3.2 Експериментальне визначення залежності швидкості евакуації відвідувачів, з наявністю серед них маломобільних груп населення М1, М3 та М4, від щільності потоку	119
3.3 Експериментальні дослідження евакуації з торговельно-розважального центру з перебуванням у ньому осіб груп мобільності М4 та їх рятування пожежно-рятувальними підрозділами за допомогою пожежних ліфтів	128
3.4 Моделювання експериментальних досліджень евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності за допомогою програмного забезпечення	139
3.4.1 Математичний алгоритм моделі	140
3.4.2 Моделювання експериментальних досліджень евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності за допомогою програмного забезпечення	148
3.5 Обґрунтування поправочних коефіцієнтів впливу щільності та відсоткового співвідношення людей маломобільних груп на швидкість людського потоку	155
3.6 Висновки за розділом.....	168
РОЗДІЛ 4 РОЗРАХУНОК ЧАСУ ЕВАКУАЦІЇ ЛЮДЕЙ У РАЗІ ПОЖЕЖІ З ТОРГОВЕЛЬНО-РОЗВАЖАЛЬНОГО ЦЕНТРУ З ПЕРЕБУВАННЯМ У НЬОМУ МАЛОМОБІЛЬНИХ ГРУП НАСЕЛЕННЯ	172
4.1 Визначення розрахункового часу евакуації людей з будівлі торговельно-розважального центру за допомогою індивідуально-потокової моделі.....	172
4.2 Розрахунок часу від початку пожежі до блокування небезпечними чинниками пожежі шляхів евакуації та евакуаційних виходів в будівлі ТРЦ із використанням польової моделі.....	185
4.3. Висновки за розділом.....	201
РОЗДІЛ 5 АПРОБАЦІЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	203

5.1 Рішення по мінімізації початкового часу евакуації з будівлі торговельно-розважального центру	203
5.2 Обґрунтування ефективності регулярного проведення навчань з евакуації відвідувачів ТРЦ для мінімізації тривалості початкового етапу евакуації	205
5.3 Рекомендації проведення навчальних евакуацій з торговельно-розважального центру для підвищення ефективності евакуаційного процесу в умовах наявності маломобільних груп населення	206
5.4 Висновки за розділом	210
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	212
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	215
ДОДАТКИ	227
ДОДАТОК А СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	228
ДОДАТОК Б АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ	232
ДОДАТОК В РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕВАКУАЦІЇ ЗМІШАНИХ ПОТОКІВ ЛЮДЕЙ РІЗНИХ ГРУП МОБІЛЬНОСТІ	237
ДОДАТОК Г РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕВАКУАЦІЇ ЗМІШАНИХ ПОТОКІВ ЛЮДЕЙ РІЗНИХ ГРУП МОБІЛЬНОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	247
ДОДАТОК Д ДИНАМІКА ВИХОДУ ТА ШВИДКІСТЬ ПОТОКУ АГЕНТІВ КРІЗЬ ЕВАКУАЦІЙНИЙ ВИХІД	268
ДОДАТОК Е ЗВЕДЕНІ РЕЗУЛЬТАТИ РЕГРЕСІЙНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ	279

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

ТРЦ – торговельно-розважальний центр

МГН – маломобільні групи населення

НЧП – небезпечні чинники пожежі

НС – надзвичайна ситуація

СОУЕ – система оповіщення та управління евакуацією

ДСНС – Державна служба України з надзвичайних ситуацій

ГДК – гранично допустима концентрація

ВООЗ – Всесвітня організація охорони здоров'я

FDS – Fire Dynamics Simulator

NIST – Національний інститут стандартів і технологій США

CFD – обчислювальна гідродинамічна модель

США – Сполучені Штати Америки

AEP – available evacuation passageway

ЄС – Європейський Союз

ВСТУП

Сучасний етап розвитку міст відзначається створенням значної кількості об'єктів з великою кількістю людей, включаючи осіб з обмеженими можливостями. Серед таких об'єктів можна відзначити ТРЦ, театри, вокзали, аеропорти, а також культові будівлі і споруди. Останніми десятиліттями величезний розвиток в Україні отримали ТРЦ. Такі будівлі розраховані на одночасне обслуговування значної кількості відвідувачів і згідно з практикою більшість із них має складне планування. Однією з їх особливостей також є наявність великої пожежної навантаги. Ризик травматизму під час пожежі людей з особливими потребами є значно вищим, ніж у інших відвідувачів ТРЦ.

Важливо враховувати, що особи з інвалідністю є лише частиною більш обширної категорії - маломобільні групи населення (далі – МГН). Згідно з різними джерелами [1, 2], маломобільне населення становить від 30 % до 50 % загального числа людей. Згідно з [3], до маломобільного населення відносяться ті, хто має труднощі у самостійному пересуванні, отриманні послуг, доступі до необхідної інформації чи орієнтуванні в просторі. До цієї групи входять інваліди, люди з тимчасовими обмеженнями, вагітні жінки, особи похилого віку та батьки з дитячими візками. Під час проектування об'єктів, призначених для МГН, слід забезпечувати: доступність місць призначення та безперешкодний рух всередині будівель і споруд; безпеку маршрутів руху (включаючи евакуаційні маршрути), а також місць проживання, обслуговування та праці; своєчасне надання повноцінної та якісної інформації для МГН для орієнтації в просторі, використання обладнання (включаючи самообслуговування), отримання послуг та участі в навчанні та праці; комфортні умови навколишнього середовища [3].

Статистичні дані та сучасні демографічні тенденції вказують на те, що у світі спостерігається зростання чисельності осіб зі стійкими порушеннями стану здоров'я, викликані хронічними захворюваннями, травмами та вродженими вадами. Стійкі порушення стану здоров'я обумовлюють обмеження життєдіяльності людини, які полягають у повній чи частковій втраті людьми

здатності до самообслуговування, пересування, орієнтації, спілкування, контролю своєї поведінки різного ступеня тяжкості. Незважаючи на наявні обмеження життєдіяльності, особи із інвалідністю мають право, на рівні з іншими громадянами умови існування, вести незалежний спосіб життя й усебічно брати участь в усіх громадських заходах, вчитися, працювати та ін.

Згідно із статистикою Мінсоцполітики [4] кількість людей з інвалідністю в Україні зросла на 300 тисяч. Тому побудова гуманного та демократичного суспільства має передбачати підвищення уваги до всіх груп населення, особливо до слабких та хворих людей, якими можна вважати маломобільні групи людей, котрі можуть потребувати допомоги під час пересування, отримання послуг, необхідної інформації або орієнтування в просторі.

Актуальність теми дослідження. Евакуація людей з різним рівнем мобільності є важливим аспектом планування та координації дій в умовах надзвичайних ситуацій. Забезпечення ефективної та безпечної евакуації для маломобільних осіб, дітей, літніх людей, а також інших вразливих груп населення вимагає спеціалізованих стратегій та рішень. У сучасному світі, коли ми стикаємося з різноманітними загрозами, від природних катастроф до терористичних актів, ефективна методика евакуації змішаного потоку людей з різним рівнем мобільності є вирішальною для забезпечення безпеки та мінімізації втрат життя.

Дослідженням евакуації людей з ТРЦ та будівель з масовим перебуванням людей займалися Т. J. Shields, К. E. Boyce, D. Helbing, S. Tanaka, A. Dederichs, A. R. Larusdottir, D. Bruck, M. Horasan, A. F. Van Bogaert, Y. Murozaki, K. Ohnishi, S. Gamache, J. A. Capote, R. Ono, В. В. Ковалишин, О.В. Хлевой, С.В. Цвіркун, О.М. Тесленко, С.З. Цимбалістий, О.М. Крикун, Р.І. Майборода та інші. Однак, в цих працях не приділено достатньо уваги питанню евакуації змішаного потоку людей з наявністю в ньому осіб різних груп мобільності М1, М3, М4 у складі змішаних евакуаційних потоків. Не вирішено наукові задачі, що дадуть змогу в подальшому вивести залежності середнього значення швидкості змішаного

людського потоку під час евакуації з ТРЦ від щільності та відсоткового співвідношення учасників груп мобільності M1, M3 та M4.

Нині [5] Пожежна безпека. Загальні положення є основним документом з розрахунку часу евакуації, але не містить достатніх вказівок для розрахунків, зважаючи на різні конфігурації потоків людей із перебуванням в них осіб різних груп мобільності, тоді як у реальних ситуаціях ми маємо справу з різноманітним відсотковим співвідношенням людей різних груп мобільності або немобільних осіб, які не можуть рухатися без допомоги. У документі немає необхідних рекомендацій для таких ситуацій, зокрема для медичних установ та інших об'єктів з масовим перебуванням людей, де присутні немобільні особи.

Забезпечення безпеки шляхом евакуації у випадку пожежі є одним із найважливіших завдань. На жаль, у цьому контексті рівень інклюзії поки що залишається дуже низьким порівняно з показниками країн ЄС, що вказує на продовження тенденції активного розвитку у майбутньому. У зв'язку із війною для нашої держави інклюзія як ніколи стала актуальним питанням, тому при її впровадженні виникає чимало проблем, у тому числі щодо заходів із забезпечення пожежної безпеки. Особливо це стосується зростання кількості маломобільних громадян, які належать до груп мобільності M3 та M4, адже саме ці категорії населення потребують найбільших адаптаційних заходів під час евакуації. Збільшення частки таких осіб підвищує вимоги до систем евакуації та заходів пожежної безпеки, що робить необхідним вдосконалення методів та підходів до організації безпечної евакуації в умовах пожеж та надзвичайних ситуацій.

Отже, дослідження проблематичних аспектів та визначення шляхів забезпечення захисту і підтримки осіб різних груп мобільності, що сприятимуть створенню суспільства з рівними можливостями, є важливим та актуальним завданням для поліпшення якості життя людей.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота є продовженням науково-дослідної роботи «Наукове обґрунтування залежності швидкості руху людських потоків із урахуванням наявності в них маломобільних людей різних груп» («Евакуація - групи

мобільності») (ДР № 0120U103756) яка виконувалась відповідно до п. 16 плану наукової та науково-технічної діяльності ДСНС України на 2020 рік від 26.12.2019 та для реалізації вимог [3], на замовлення Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям ДСНС України та відповідно до основних напрямів наукової діяльності ІДУ НД ЦЗ.

Ідея роботи полягає в удосконаленні методики розрахунку часу евакуації людей з торговельно-розважальних центрів з урахуванням наявності маломобільних осіб різних груп, у тому числі із змінюваним відсотковим співвідношенням. Дослідження спрямоване на аналіз та розкриття впливу цих факторів на процес евакуації під час пожежі, що дозволить розробити більш точні та ефективні стратегії в разі виникнення надзвичайних ситуацій. Дослідження передбачає експериментальне визначення залежностей між швидкістю руху людського потоку та його щільністю за різних конфігурацій, а також моделювання цих процесів для оптимізації евакуаційних стратегій.

Мета роботи є розкриття закономірностей руху людського потоку в умовах ТРЦ, що складається з людей різних груп мобільності від щільності та відсоткового співвідношення людей маломобільних груп, як наукового підґрунтя удосконалення методики визначення розрахункового часу евакуації людей із приміщень будівель і споруд під час пожежі.

Завдання дослідження:

- проаналізувати поточний розвиток ТРЦ в Україні та за кордоном, ідентифікувати проблеми, пов’язані з нормуванням вимог щодо пожежної безпеки для евакуаційних шляхів та виходів в ТРЦ і розглянути можливі шляхи їх вирішення;
- провести натурні спостереження в реальних умовах ТРЦ, для отримання та аналізування даних щодо поведінки людей під час евакуації, руху змішаних людських потоків які включали людей груп мобільності М4 та їх рятування із пожежобезпечних зон, пожежно-рятувальними підрозділами;
- дослідити евакуацію людей різних груп мобільності (М1, М3, М4) з метою формування емпіричних баз даних та визначення залежності швидкості

змішаного людського потоку від щільності та відсоткового співвідношення учасників груп мобільності M1, M3, M4;

- змоделювати експериментальні дослідження евакуації людей різних груп мобільності M1, M3 та M4 з використанням програмного забезпечення;

- провести чисельний експеримент з метою оцінки впливу щільності (D), частки учасників, що користуються опорами (милицями) (M3), та частки учасників, які пересуваються на візках (M4) на швидкість руху людського потоку та розробити пропозиції щодо удосконалення методики визначення розрахункового часу евакуації людей із приміщень будівель і споруд під час пожежі;

- розробити рекомендації проведення навчальних евакуацій з ТРЦ спрямовані на підвищення ефективності евакуаційного процесу в умовах наявності маломобільних груп населення.

Об'єкт дослідження – процес евакуації під час пожежі змішаного людського потоку, що включає учасників різних груп мобільності з торговельно-розважальних центрів.

Предмет дослідження – удосконалення розрахункового методу визначення тривалості евакуації людей у торговельно-розважальних центрах з урахуванням наявності маломобільних людей різних груп.

Методи дослідження. В дослідженні застосовано комплексний підхід, який включає в себе наступні складові: аналіз і узагальнення сучасних науково-технічних досягнень у сфері вивчення процесів евакуації людей різних груп мобільності із будівель ТРЦ; проведено натурні спостереження за рухом людських потоків для створення статистичної бази даних на основі емпіричних досліджень; використано методи математичної статистики для аналізу результатів натурних спостережень і оцінки ефективності запропонованих організаційно-технічних заходів; використано спрощені аналітичні, індивідуально-потоківі та імітаційно-стохастичні моделі для розрахунку необхідного часу евакуації з будівель ТРЦ.

Наукова новизна роботи полягає у розкритті особливостей руху змішаного

людського потоку в умовах ТРЦ, який включає учасників різних груп мобільності (М1, М3, М4) залежно від щільності потоку та відсоткового співвідношення маломобільних осіб для подальшого удосконалення методики визначення розрахункового часу евакуації з приміщень будівель і споруд під час пожежі. При цьому:

Вперше:

- створено емпіричну базу даних щодо швидкості руху та поведінки людей під час евакуації, що дало можливість розрахувати параметри руху людського потоку необхідні для проведення чисельного експерименту;
- встановлено залежність швидкості змішаного людського потоку від щільності та відсоткового співвідношення учасників груп мобільності М1, М3 та М4:

$$V_{\text{сер}} = 95,47131679 - 83,02423075D_{\text{сер}} - 2,751822156\alpha_{\text{М3}} - 4,64221358\alpha_{\text{М4}} + \\ + 1,576260255D_{\text{сер}}\alpha_{\text{М3}} + 3,63924295D_{\text{сер}}\alpha_{\text{М4}} + 0,529491833\alpha_{\text{М3}}\alpha_{\text{М4}} - \\ - 0,746254255D_{\text{сер}}\alpha_{\text{М3}}\alpha_{\text{М4}}$$

Набуло подальшого розвитку:

- визначення залежностей швидкості змішаного людського потоку від щільності та відсоткового співвідношення учасників різних груп мобільності за допомогою експериментальних та розрахункових методів, що дозволило оцінити динаміку людського потоку під час евакуації та використання комп'ютерного моделювання для збільшення обсягу наявних даних та ефективного оцінювання адекватності проведених експериментальних досліджень;
- вдосконалення методики натурних спостережень в реальних умовах ТРЦ щодо поведінки людей під час евакуації, руху змішаних людських потоків груп мобільності М1 та М4 і рятування груп М4 із пожежобезпечних зон, пожежно-рятувальними підрозділами.

Удосконалено розрахунково-інформаційну базу щодо визначення розрахункового часу евакуації людей різних груп мобільності із приміщень будівель і споруд під час пожежі.

Практичне значення отриманих результатів полягає в удосконаленні розрахункового методу визначення часу евакуації людей різних груп мобільності із приміщень будівель і споруд під час пожежі. На основі проведених досліджень розроблено рекомендації щодо проведення навчальних евакуацій з ТРЦ, спрямовані на підвищення ефективності евакуаційного процесу в умовах наявності маломобільних груп населення.

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні ідеї дослідження, встановленні його мети та завдань, а також об'єкта та предмета дослідження, самостійному аналізі джерел інформації, як вітчизняних, так і міжнародних, а також удосконалення та розробку методології досліджень, проведенні експериментальних досліджень, обробці отриманих результатів та формулюванні та узагальненні висновків. Участь автора у спільних наукових роботах, які включені до переліку опублікованих праць за темою дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дослідження доповідалися на всеукраїнських та міжнародних науково-практичних конференціях, таких як:

- X Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020 р.);
- XII International scientific and practical conference «Innovations and prospects of world science» (Vancouver, Canada, 2022 р.);
- Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення» (м. Львів: ЛДУБЖД, 2022 р.);
- XII Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022 р.);
- Міжнародна науково-практична конференція «Problems of Emergency Situations» (м. Харків, НУЦЗУ, 2024 р.);

– XIX Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності» (м. Львів: ЛДУБЖД, 2024 р.);

– VI Міжнародна науково-практична конференція «Theoretical and empirical scientific research: Concept and trends» (Oxford, UK, 2024 p.);

– XX international scientific internet conference «Intelligent systems of decision-making and problems of computational intelligence» (Khmelnitskyi, Ukraine, Usti nad Labem, Czech Republic 2024 p.).

Кількість публікацій за темою дисертаційної роботи. Основні положення дисертації відображено в 6 наукових статтях, 5 з яких віднесено до переліку фахових, що входять до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Google Scholar, Open Academic Journals Index та інших, 1 стаття, що входить до міжнародної наукометричної бази Scopus. Результати досліджень також висвітлено в 9 доповідях на всеукраїнських та міжнародних науково-практичних конференціях. Результати натурного експерименту в ТРЦ було включено до матеріалів 1 методичного посібника.

Структура дисертації та її обсяг. Робота містить анотацію, зміст, вступ, має п'ять розділів, загальні висновки, список використаних джерел і додатки. Загальний обсяг дисертації становить 289 сторінок, з них основного тексту 226 сторінок, 93 таблиці, 87 рисунків, список використаних джерел містить 101 найменування та займає 12 сторінок, а також 6 додатків на 62 сторінках.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ І ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ ТА ЕВАКУАЦІЇ В ТОРГОВЕЛЬНО-РОЗВАЖАЛЬНИХ ЦЕНТРАХ

Відвідування ТРЦ є буденною складовою життя сучасної людини. Зазвичай вони включають в себе різні види магазинів, розважальних та рекреаційних послуг, що збільшує попит на заклади подібного типу. Розвиток сучасних ТРЦ є відповіддю до зросту різноманітності видів послуг та розваг. Таким чином змінюються і вимоги до планувальної структури кожного конкретно взятого приміщення в споруді, та закладу в цілому, а також до забезпечення безпеки людей шляхом евакуації у випадку пожежі в тому числі і людей з фізичними обмеженнями, що є одним з найважливіших завдань.

Адже під захистом людей з фізичними обмеженнями слід розуміти не лише покращення їх соціального становища, підвищення доходів та якості життя, а й забезпечення їхньої безпеки. Першочерговим елементом забезпечення безпеки у разі пожежі є своєчасна та безперешкодна евакуація. На сьогодні евакуація таких людей є одним із найскладніших питань забезпечення безпеки під час пожежі. Це зумовлено не тільки особливостями їх організму, а й недостатнім вивченням процесу їх евакуації відносно евакуації здорових людей.

1.1 Аналіз досліджень поточного стану заходів пожежної безпеки в торговельно-розважальних центрах

З інтенсивним ростом економіки та швидким процесом урбанізації, покращується рівень життя, що призводить до підвищення вимог до ТРЦ. У зв'язку з цим, зводиться значна кількість великих комерційних будівель, котрі, як правило, включають в себе атріуми та різноманітні функції, такі як ресторани, відпочинок, туризм, проживання, фінанси, культура та інше. Часто ці центри поєднуються з житловими, адміністративними та спортивними об'єктами. З урахуванням великих площ торгових центрів та значної кількості відвідувачів та персоналу, основними аспектами пожежної безпеки, на які слід звернути увагу, є вчасне виявлення пожежі та безпечна евакуація відвідувачів. Посилення цих аспектів допоможе зменшити можливі збитки від пожеж та ризику для життя.

Дослідженнями проблеми пожежної безпеки в ТРЦ займається значна кількість дослідників світу та українських науковців [6], що свідчить про великий інтерес до цієї проблематики як на міжнародному, так і на національному рівнях. Результати цих досліджень надають важливі висновки та рекомендації для покращення систем безпеки та запобігання можливим негативним наслідкам пожеж у ТРЦ.

У наш час, основними регуляторами у сфері пожежної безпеки торговельно-розважальних закладів є ряд нормативних документів, зокрема [7–10] та інші.

Пожежна безпека охоплює широкий спектр заходів та правил, спрямованих на уникнення пожеж, забезпечення безпеки осіб під час виникнення пожежі та мінімізацію матеріальних збитків. Це включає в себе вчасне запобігання пожежам, правильне проектування будівель з урахуванням безпеки, належне обладнання пожежними системами, навчання персоналу з питань пожежної безпеки, встановлення необхідного пожежного обладнання та проведення ефективних евакуаційних заходів.

Основними компонентами системи протипожежного захисту (СПЗ) в більшості сучасних ТРЦ є: система пожежної сигналізації, система оповіщення та управління евакуацією людей, автоматична система пожежогасіння (з урахуванням автономних систем локального пожежогасіння), система протидимного захисту, система централізованого пожежного спостереження, система диспетчеризації СПЗ, пожежні ліфти, система блискавкозахисту будівлі, протипожежні перешкоди (двері, ворота, завіси, клапани) та інше.

Зазначені компоненти гарантують безпеку від пожеж як перед їх виникненням, так і після виникнення пожежі (система сигналізації виявляє пожежу на початковому етапі та сповіщає людей про небезпеку, активуючи відповідні протипожежні системи). Зрозуміло, що регулярне обслуговування цих систем є основним обов'язком власників таких закладів, а відхилення від норм і вимог пожежної безпеки може вести до серйозних наслідків у вигляді жертв та матеріальних збитків.

У своєму звіті [11] голландські дослідники акцентують увагу на впливі розташування громадських будівель на кількість пожеж. У окремо розташованих громадських будівлях кількість пожеж у період трьох років становила 65 випадків. Протилежна ситуація спостерігалася в заблокованих торгових центрах, де трапилося 91 пожежа протягом того самого періоду, що свідчить про значний вплив такого з'єднання з іншими будівлями на кількість пожеж. Згідно з цим звітом, приріст кількості пожеж для заблокованих торгових центрів становить 40%.

Статистика за п'ять років [12] вказує, що щороку в пожежах в торговельних закладах США травмується середньо 299 осіб, при цьому гине 12 осіб. Збитки від пожеж становлять \$604 млн. Основні причини пожеж включають кухонне обладнання (21 %), електророзподільчі та освітлювальні прилади (15 %), опалювальне обладнання (11 %) і підпали (11 %). Щодо виникнення пожеж, кулінарні матеріали становлять 13%, ізоляція електропроводів – 10 %, сміття – 9 %, легкозаймисті речовини – 8 %. Джерела тепла, що знаходяться біля горючих матеріалів, викликали 9 % пожеж, проте на них припадає 40 % від загальної кількості смертей. Пожежі, що виникали в період з 21:00 до 05:00, призводили до середніх збитків у розмірі \$73 тис., у той час як середні збитки від пожеж з 05:00 до 21:00 складали \$33 тис. Видно, що пожежі, які виникали в період з 21:00 до 05:00, становили 32 % від загальної кількості смертей, підкреслюючи важливість належного функціонування протипожежних систем.

У дослідженні [13] проведено аналіз статистики пожеж в Бангладеш, в результаті чого виявлено, що протягом 20 років кількість пожеж зросла у п'ять разів. У 2019 році принаймні 4057 пожеж були пов'язані з торговими центрами та ринками, що становить приблизно 17 % від загальної кількості пожеж у тому ж році. Автор роботи вказує, що основною причиною збільшення кількості пожеж є те, що лише 3,6 % торгових центрів у країні відповідають встановленим стандартам пожежної безпеки, тоді як 56,1 % та 40,3 % торгових центрів були оцінені як «ризиковані» та «дуже ризиковані» відповідно. Недостатня реакція на цю проблему призвела до зростання кількості пожеж.

Зростання кількості пожеж є проблемою, яка набула вияву в ряді подій. Наприклад, у 2016 році розважальний центр «МІ100» у Львові [14] став місцем пожежі, яка призвела до постраждання 25 осіб. Двоє з них опинилися в реанімації, однак один з них помер через критичний стан з 95 % опіками тіла. Свідчення очевидців вказують на паніку відвідувачів та їхню перешкоду рятувальникам. Причина пожежі полягала в необережному поводженні із вогнем під час феєр-шоу, що призвело до загорання декорацій та швидкого поширення вогню. Події, такі як пожежа у ТРЦ Forum Lviv у 2020 році [15], знову підкреслюють проблеми. Цей торговий центр, один із найбільших в Україні, став місцем пожежі через займання кухонного обладнання в одному з магазинів. Зазначено, що наявні системи протипожежного захисту вчасно спрацювали, уникнувши травм та загибелі.

У 2021 році в Первомайську, Миколаївська область, виникла пожежа в торговому центрі «Епіцентр» [16]. Велика пожежна навантага та швидке поширення вогню призвели до розповсюдження пожежі на площу 4000 кв.м. Системи виявлення та ліквідації пожежі виявилися неефективними, що призвело до значних матеріальних збитків (рис. 1.1).



а)



б)

Рисунок 1.1 – Пожежа в торговельному центрі Епіцентр [16]: а) – рятування потерпілих; б) – момент пожежі в торговельному центрі

29 жовтня 2022 року відбулася пожежа в універмазі Jinsheng у Нанкіні, провінція Цзянсу, Китай [17]. Інцидент тривав більше десяти годин, під час якого вогонь охопив весь торговельний центр, призводячи до знищення внутрішнього оздоблення будівлі. Місцева пожежна служба повідомила, що спалахнула будівля

мала значний об'єм, велику пожежну навантагу та складну внутрішню конструкцію.

Враховуючи вищезазначене встановлено, що існує взаємозв'язок між виникненням пожеж, їх розмірами, матеріальними збитками, втратами людських життів та нехтуванням вимогами протипожежної безпеки. Пожежі, які виникають вночі, коли основний контроль за пожежною безпекою об'єкта покладено на існуючі системи, призводять до збитків більших в 2,3 рази. Це підкреслює необхідність впровадження більш ефективних систем протипожежного захисту.

На підставі минулих пожеж можна стверджувати, що наявність систем не гарантує виключення можливості виникнення пожежі, але вдосконалення пожежної безпеки допомагає мінімізувати матеріальні та можливі людські втрати.

З березня 2022 року, в Україні заборонено проведення планових та позапланових заходів державного нагляду та контролю [18]. Технічне обслуговування систем пожежної сигналізації та оповіщення має виконуватися відповідно до [19]. Недотримання регулярності обслуговування систем суттєво знижує їхню ефективність, і невиконання цього може призвести до відповідальності, яка регламентується [20] і включає штраф у розмірі від 100 до 200 неоподаткованих мінімумів без припинення роботи закладу.

Використовуючи метод аналізу дерева несправностей (FTA), проведено оцінку надійності систем спринклерного пожежогасіння на прикладі 18 торговельних центрів Австралії [21]. Встановлено, що ймовірність відмови в будівлях австралійських торговельних центрів коливається в діапазоні від 1,4 % до 9,8 %, що відповідає діапазону надійності від 90,2 % до 98,6 %. Подібно до висотних офісних будівель, виходження з ладу спринклерних зрошувачів та втрата ізоляції вузла керування під час модернізації системи гасіння значно впливають на надійність спринклерної системи пожежогасіння. Проте поділ на більшу кількість спринклерних секцій і своєчасне обслуговування компонентів системи в торгових центрах призводять до підвищення її надійності.

У дослідженні [22] розглядається проблема евакуації з підземних зон торговельно-розважальних закладів. Враховуючи поведінку людей у ситуаціях,

пов'язаних з пожежею, таких як уникнення наближення до вогню під час евакуації, та припускаючи найгірший сценарій, автори пропонують модель для визначення оптимального розташування джерела пожежі з урахуванням наявності кількох виходів. Далі це дослідження моделює пожежу в підземному торговельному центрі за допомогою програмного забезпечення Pyrosim. Модель чітко відображає розподіл ризику евакуації в різних зонах усередині будівлі, що може служити як основа для розробки систем протипожежного захисту для торговельних центрів і планів евакуації у разі пожежі. Крім того, кількість осіб у приміщенні, час, який витікає до початку руху та ширина безпечних виходів мають суттєвий вплив на ризик евакуації під час пожежі в торговельних центрах. Зокрема, кількість осіб у будівлі та час від моменту виникнення пожежі до початку евакуації позитивно корелюють з ризиком евакуації, тоді як ширина евакуаційних виходів взаємодіє негативно. Найбільший вплив на ризик евакуації має кількість осіб всередині будівлі.

В статті [23] проведено аналіз методів оцінювання пожежних ризиків в Україні, Сполучених Штатах та Європейському Союзі, і виявлення їхніх недоліків у сценаріях розвитку пожеж, часу початку евакуації, розгляд як складової частини комплексної оцінки індивідуальних та соціальних ризиків в області інжинірингу пожежної безпеки. Після проведеного аналізу виявлено, що є необхідність у більш ретельному підході до вибору можливих сценаріїв пожеж, і також виявлено недоліки в українській методиці розрахунку часу початку евакуації. Ці недоліки можуть значно вплинути на кінцевий розрахунок індивідуальних та соціальних ризиків в рамках комплексного інжинірингу пожежної безпеки.

У роботі [24] досліджується метод просторового синтаксису з метою оцінки об'ємно-просторової організації торговельних центрів з різними планувальними схемами. Автор використовує цей метод для визначення дизайну торговельного центру, організації його простору і передбачення можливих перешкод, які можуть ускладнити швидку евакуацію персоналу та відвідувачів ТРЦ.

В одному з архітектурних рішень, яке часто зустрічається у ТРЦ, висвітлюється атриум. У роботі [25] розглядається проблема контролю

задимлення в евакуаційних проходах на верхньому поверсі атріуму. Автори, враховуючи евакуаційну поведінку людей під час пожежі, пропонують концепцію доступного евакуаційного проходу (АЕР). З метою контролю диму в АЕР запропоновано використовувати зону дихання, поєднану із підпірною системою повітря під підлогою. У зв'язку з ефектом труби, верхній поверх атріуму зазвичай найбільше постраждає від задимлення. Вивчено вплив розміщення вхідних отворів для підпірного повітря та швидкості потоку підпірюваного повітря на контроль диму в АЕР. Дослідження показує, що при оптимальних параметрах, таких як ширина отвору для підпору повітря 0,2 м, розміри отворів для підпору повітря в зоні дихання 0,5 м × 1 м (ширина × висота), і відстань між двома сусідніми отворами для підпору 1,85 м, розподіл повітря виявляється найбільш рівномірним, а ефективність контролю диму досягає оптимальних значень. Таке розміщення вхідних отворів призводить до того, що при швидкості потоку повітря, рівній 90% від швидкості виведення диму, концентрація СО, температура та видимість у АЕР відповідають необхідним вимогам для евакуації.

У статті [26] автор розглядає ряд пожеж, що виникли в одній з країн східної Європи, звертаючи увагу на недостатню реакцію контролюючих органів, велику кількість жертв та значні матеріальні збитки при таких подіях, а також на широкий суспільний резонанс.

У дослідженнях [27, 28] розглядається використання повітряних завіс у торговельних центрах. Аналізується поширення тепла та диму при пожежах у торговельних центрах з використанням повітряних завіс в критичних зонах та порівняння цього з випадками, коли повітряні завіси відсутні. Отримані результати свідчать про позитивний вплив повітряних завіс у зменшенні розповсюдження тепла та диму та у збільшенні безпечного часу для евакуації. Показано, що при використанні повітряних завіс зі швидкістю 10 м/с можливо обмежити близько 37 % виділеного тепла під час пожежі. Встановлення двоетапних повітряних завіс на місцях пожежі та на сходах може зменшити розповсюдження тепла на сходовій клітці до 68 %. Результати цих досліджень можуть надати вичерпну інформацію про роль та ефективність повітряних завіс у

стримуванні тепла та диму, сприяючи тим самим безпечній евакуації при пожежі в торговельних центрах.

У статті [29] автор досліджує ймовірнісну модель наповнення димом у великих просторах. Проведені експериментальні випробування щодо природного наповнення димом, яке виникає внаслідок пожежі електромобіля, наприклад, на паркінгу ТРЦ, порівнюються з моделлю наповнення димом у великих приміщеннях. Шляхом порівняння відмінностей між часом задимлення та часом евакуації визначається ймовірність відмови системи димовидалення через вплив невизначених факторів. Ця модель може служити для оцінки ризику виникнення пожежі у великих приміщеннях.

У роботі [30] пропонується система оцінки ризику пожежі для великих комерційних будівель, зосереджена на аналізі безпеки протипожежної системи в таких будівлях. Було визначено систему індексів оцінки через дослідження на місці та консультації експертів та визначено вагу кожного індексу методом структурної ентропійної ваги. Встановлено правила оцінки відповідно до відповідних законів і норм. Завершивши цей процес, можна отримати оцінку та відповідний рівень ризику пожежі. Крім того, чотири великі комерційні будівлі в Чунціні (Китай) були взяті як приклади для розрахунку рівня ризику пожежі за запропонованою системою оцінки.

Враховуючи розміри торговельних центрів, слід відзначити величезні збитки, які несуть їх власники у випадку примусової зупинки таких споруд. Однією з таких проблем є евакуація всіх людей з ТРЦ при невірному спрацюванні систем протипожежного захисту, що призводить до втрат прибутків. Цю проблему розглядає робота [31], в якій автор досліджує дані пожежно-рятувальної служби Нового Південного Уельсу за період з 2008 по 2018 роки щодо помилкового спрацювання систем протипожежного захисту. За даними автора, відсоток помилок становив приблизно 97 % усіх викликів. Основною метою дослідження було оцінити економічне навантаження від помилкових активацій протипожежних систем. Результати цього дослідження показали, що в 2018-2019 роках помилкові активації систем протипожежного захисту викликали середні

економічні збитки в розмірі 246 мільйонів австралійських доларів на рік для штату Нового Південного Уельсу за найкращим сценарієм і 349 мільйонів австралійських доларів на рік за базовим сценарієм. Це відповідає середній вартості від 4952 до 7403 австралійських доларів за один випадок хибної тривоги, спровокований системою. Висока економічна вартість цих невиправданих викликів підкреслює важливість подальших ініціатив, спрямованих на безпечне зниження частоти помилкових активацій систем протипожежного захисту.

Цю проблему також розглядає робота [32], використовуючи метод Баєсової оцінки. Системи сповіщення про пожежу часто використовують димові сповіщувачі, які, однак, часто генерують велику кількість хибних тривог. Заміна всіх встановлених димових сповіщувачів за короткий період є трудомістким завданням, і підвищення точності виявлення пожежі стає суттєвою проблемою. Таким чином, автор пропонує метод оцінки пожежної тривоги з використанням кількох димових сповіщувачів на основі Баєсівської оцінки. Розроблено метод класифікації послідовності тривог на основі запропонованого критерію для оцінки справжніх пожеж та підтверджено його моделюванням як справжніх пожеж, так і помилкових спрацювань. Результати свідчать, що запропонований метод може виявляти 77,5 % хибних тривог.

Під час аналізу наукових джерел варто відзначити, що дослідженню процесу видалення продуктів горіння, з урахуванням їх димоутворювальної здатності та масової швидкості вигорання, приділяється недостатньо уваги. У проектуванні недостатньо враховується пожежна навантага, а також лінійна швидкість розповсюдження полум'я в приміщеннях ТРЦ різного призначення і як наслідок ускладнюється прогнозування безпечної евакуації людей.

Практично невивченим напрямком залишається використання можливостей відеоспостереження, розташованого в торговельно-розважальних закладах, як одного з елементів системи пожежної сигналізації та різновиду спостереження за евакуацією відвідувачів які відносяться до маломобільних груп населення.

1.2 Аналіз статистики пожеж в торговельно-розважальних центрах

На сучасний момент в Україні спостерігається перехід від радянських універмагів до утворення мультифункціональних ТРЦ. При їх розробці та будівництві інвестори та забудовники враховують досвід країн ЄС та США, проте використовують чинні в Україні нормативні документи, оновлення яких до європейських стандартів відбувається досить повільними темпами. Важливо відзначити, що інспектори з питань нагляду та контролю пожежної та техногенної безпеки не можуть ефективно взяти під контроль якість реалізації протипожежних заходів на етапі проєктування та будівництва.

Відповідно до [4] пожежна безпека об'єкта мусить забезпечуватися системою запобігання пожежі; комплексом протипожежного захисту; системою управління пожежною безпекою об'єкта. Дані системи мають характеризуватися рівнем забезпечення пожежної безпеки людей (запобігання впливу на них небезпечних чинників пожежі) та матеріальних цінностей, а також економічними критеріями ефективності витрат на її забезпечення, з урахуванням усіх стадій (наукова розробка, проєктування, будівництво, експлуатація) життєвого циклу об'єктів і виконувати одне з наступних завдань:

- мінімізувати ймовірність виникнення пожежі;
- забезпечувати пожежну безпеку людей;
- забезпечувати пожежну безпеку матеріальних цінностей;
- забезпечувати пожежну безпеку людей і матеріальних цінностей одночасно.

Об'єкти мусять мати системи пожежної безпеки, спрямовані на запобігання впливу на людей небезпечних чинників пожежі, зокрема їхніх вторинних проявів на необхідному рівні.

Прийнятний рівень пожежної безпеки людей на об'єктах повинен бути не менше ніж 0,99999 на рік у розрахунку на кожну людину, а прийнятний рівень індивідуального пожежного ризику повинен бути не більше ніж 10^{-5} на рік з розрахунку на кожну людину.

Згідно із статистичними даними [33] у 2023 році в будівлях об'єктів торгівлі і харчування виникло 611 пожеж (-32,2 %), що становить 22,5 % від загальної кількості пожеж на об'єктах, на яких здійснюється державний нагляд (контроль) у сфері техногенної та пожежної безпеки. Прямі збитки зменшилися на 58,6 % та становлять 975 млн 322,5 тис. грн. (3,8 % від загальної суми прямих збитків на профілакуємих об'єктах). Побічні збитки становлять 2 млрд 407 млн 566,6 тис. грн (-35,2 %; 4,1 % від загальної суми побічних збитків на профілакуємих об'єктах).

За загального зниження кількості пожеж у будівлях об'єктів торгівлі і харчування, їх зростання зареєстровано у 6 областях України (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1

Області України, в яких зареєстровано зростання кількості пожеж у будівлях об'єктів торгівлі і харчування у 2023 році порівняно з 2022 роком

№ з/п	Назва області	2023 рік	2022 рік	+/-, (%)
1	Полтавська	12	3	зростання у 4,0 рази
2	Вінницька	10	5	зростання у 2,0 рази
3	Херсонська	53	27	96,3
4	Львівська	41	23	78,3
5	Дніпропетровська	40	29	37,9
6	Черкаська	10	8	25,0
Всього в Україні:		611	901	-32,2

У Кіровоградській і Чернівецькій областях кількість пожеж у будівлях торгівлі і харчування залишилася на рівні 2022 року.

На рис. 1.2 наведено ранжування регіонів України за кількістю пожеж у будівлях об'єктів торгівлі і харчування у 2023 році порівняно з 2022 роком.

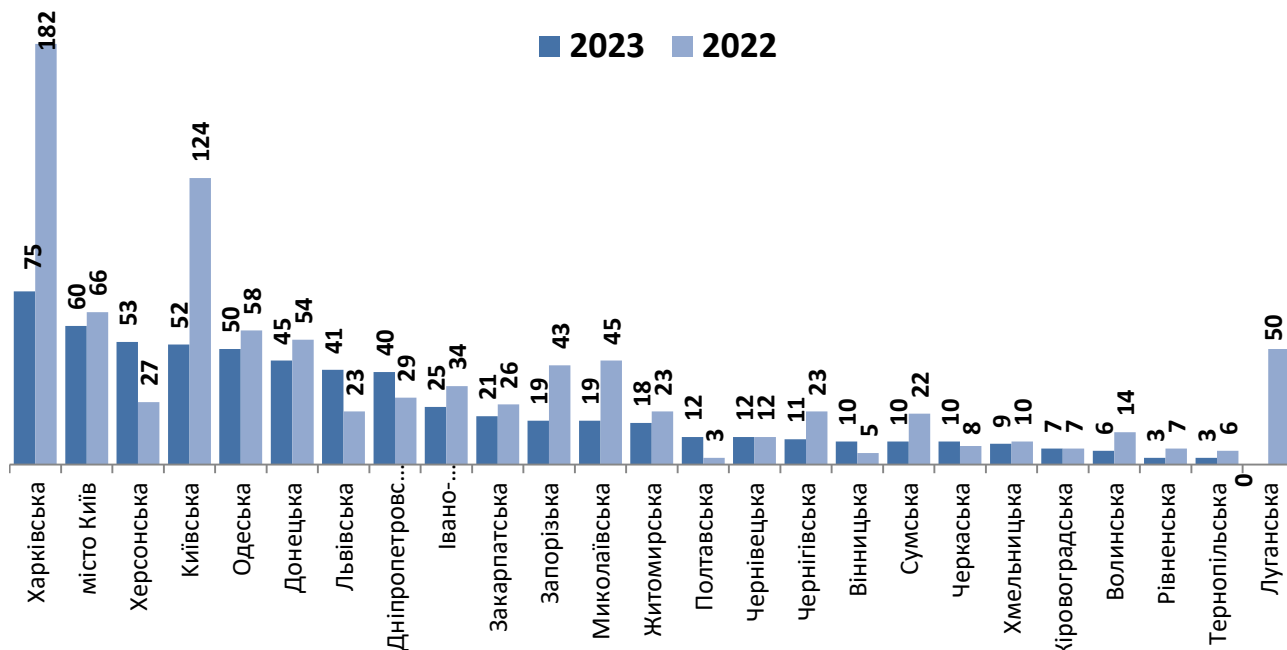


Рисунок 1.2 – Ранжування регіонів України за кількістю пожеж у будівлях об'єктів торгівлі і харчування у 2023 році порівняно з 2022 роком

На цих об'єктах загинуло 8 людей, 13 людей отримали травми. У 2022 році загинуло 6 людей і 29 людей отримало травми.

27 червня о 23 год 15 хв до Служби порятунку Хмельниччини надійшло повідомлення про пожежу в середмісті Хмельницького в ресторані «Franko», що по вул. Івана Франка, 6. За підвищеним номером виклику до місця події прибули чергові караули усіх пожежно-рятувальних частин 1-го ДПРЗ області. Майже 2,5 год 25 вогнеборців гасили вогонь, обмежуючи розповсюдження полум'я на сусідні багатоповерхівки та магазини. Гасіння ускладнювала велика пожежна навантага. Пожежу, що розповсюдилася площею 250 м², було ліквідовано о 01 год 30 хв ночі. Причиною пожежі, як з'ясували спеціалісти дослідно- випробувальної лабораторії, був підпал. Прямі збитки, завдані пожежею, склали 49 млн 400 тис. грн; побічні – 57 млн 390 тис. гривень.

У спорудах соціально-культурного, громадського та адміністративного призначення виникло 576 пожеж (-30,2 %), що становить 21,2 % від загальної кількості пожеж на об'єктах, на яких здійснюється державний нагляд (контроль) у сфері техногенної та пожежної безпеки. Прямі збитки збільшилися на 29,9 % та

становлять 1 млрд 735 млн 605,0 тис. грн (7,5 % від загальної суми прямих збитків на профілакуємих об'єктах). Побічні збитки становлять 2 млрд 312 млн 003,5 тис. грн (+23,2 %; 3,9 % від загальної суми побічних збитків на профілакуємих об'єктах).

За загального зниження кількості пожеж у спорудах соціально-культурного, громадського та адміністративного призначення, їх зростання зареєстровано у 6 областях України (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2

Області України, в яких зареєстровано зростання кількості пожеж у спорудах соціально-культурного, громадського та адміністративного призначення у 2023 році порівняно з 2022 роком

№ з/п	Назва області	2023 рік	2022 рік	+/-, (%)
1	Рівненська	9	2	зростання у 4,5 рази
2	Херсонська	69	24	зростання у 2,9 рази
3	Кіровоградська	7	5	40,0
4	Івано-Франківська	15	12	25,0
5	Запорізька	29	27	7,4
6	Сумська	21	20	5,0
Всього в Україні:		576	825	-30,2

У Вінницькій і Хмельницькій областях кількість пожеж у спорудах соціально-культурного, громадського та адміністративного призначення залишилася на рівні 2022 року.

На рис. 1.3 наведено ранжування регіонів України за кількістю пожеж у спорудах соціально-культурного, громадського та адміністративного призначення у 2023 році порівняно з 2022 роком.

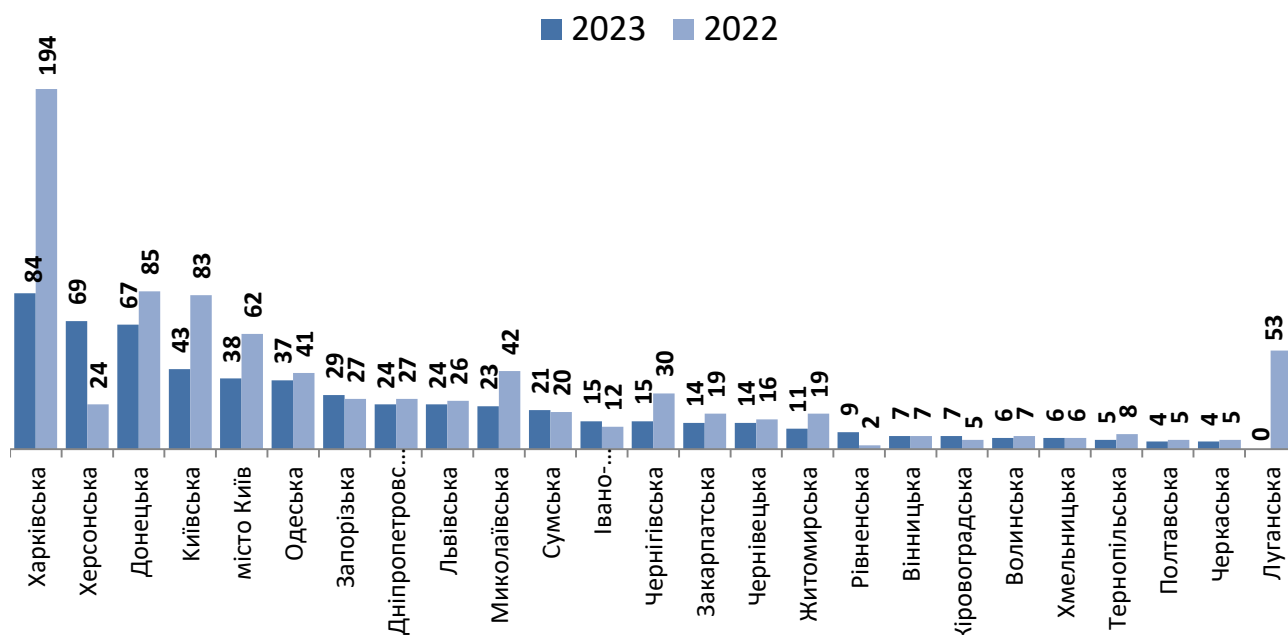


Рисунок 1.3 – Ранжування регіонів України за кількістю пожеж у спорудах соціально-культурного, громадського та адміністративного призначення у 2023 році порівняно з 2022 роком

На цих об'єктах загинуло 15 людей і 29 людей отримали травми. У 2022 році загинуло 211 людей і 103 людини отримали травми.

1.3 Дослідження процесів евакуації з торговельно-розважальних центрів

ТРЦ є одними з найбільш відвідуваних об'єктів у сучасних містах, де щодня перебувають тисячі людей. Висока концентрація відвідувачів, складна архітектура та наявність різноманітних зон з різними функціями (торгові площі, кінотеатри, ресторани тощо) створюють особливі виклики для забезпечення безпеки у разі надзвичайних ситуацій, таких як пожежі. Одним із ключових аспектів безпеки є ефективна організація та проведення евакуації.

Процеси евакуації з ТРЦ є надзвичайно складними та залежать від багатьох факторів, включаючи планування будівлі, розташування виходів, характеристики потоку людей та їхню мобільність. Дослідження цих процесів має на меті виявлення критичних факторів, які впливають на швидкість та безпеку евакуації,

а також розробку ефективних стратегій для мінімізації ризиків та збереження життя.

У даному розділі буде розглянуто сучасні підходи до вивчення процесів евакуації, проаналізовано результати експериментальних досліджень та комп'ютерного моделювання.

1.3.1 Аналіз досліджень евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності

Проведення досліджень з зазначеної тематики розкривають проблеми та визначають оптимальні шляхи забезпечення захисту та підтримки людей різних груп мобільності для створення суспільного середовища рівних можливостей.

Проведення експериментів спрямовано на вдосконалення вимог пожежної безпеки до евакуаційних шляхів і виходів шляхом встановлення закономірностей руху людських потоків, що складаються з людей різних груп мобільності.

У попередніх роботах здобувачем досліджено максимально наближену до реальної ситуацію – неанонсовану евакуацію, коли ні персонал, ні відвідувачі не знали про її навчальні цілі. Відеокамери фіксували поведінку людей та рух людських потоків з моменту спрацювання системи сповіщення до моменту виходу з будівлі та завершення евакуації людей із пожежобезпечних зон пожежно-рятувальними підрозділами. Отримано дані руху евакуації відвідувачів, котрі пересувалися на кріслах колісних з найвіддаленішої точки до пожежобезпечних зон, з яких проводилась евакуація. Встановлено загальний час евакуації відвідувачів, які пересувались на кріслах колісних, в який входить час прямування до пожежобезпечної зони, час очікування на пожежно-рятувальні підрозділи та евакуація із пожежобезпечних зон. Встановлено час евакуації людей, які пересуваються на кріслах колісних із пожежобезпечних зон, за допомогою пожежно-рятувальних підрозділів. Отримано дані щодо евакуації осіб, які пересуваються лише на кріслах колісних із пожежобезпечних зон, пожежно-рятувальними підрозділами за допомогою пожежних ліфтів в умовах, наближених до реальних. Визначено залежності швидкості руху людських потоків під час

евакуації від перебування в них осіб з інвалідністю, які пересуваються на кріслах колісних, та розраховано їх щільність на різних ділянках шляху. За результатами проведеного експерименту відкориговано план евакуації з будівлі, досліджено навички персоналу щодо їх дій в умовах пожежі [36–40].

Аналіз наукових праць, як вітчизняних, так і зарубіжних дослідників, відображає актуальні тенденції та підходи у питаннях евакуації людей. Вчені досліджують різні аспекти евакуації, включаючи рух та поведінку людей під час надзвичайних ситуацій, вплив фізичних обмежень та психологічних чинників на процес евакуації, розробку та вдосконалення методів моделювання та аналізу, а також розробку технічних рішень та інженерних систем для підвищення ефективності та безпеки евакуаційних заходів.

Науковці з Німеччини та Канади у своїй роботі [41] провели 12 досліджень, у яких брало участь 252 учасники з видимими вадами та без них, які рухалися разом у натовпі. У кожному дослідженні групи учасників пересувались по коридору зі звуженням шляху у кінці. Були проаналізовані момент прийняття швидкості, відстані між учасниками та поведінкові дії. Автори виявили що учасники з обмеженими можливостями знизили свою швидкість далі від вузького місця, ніж учасники без обмежених можливостей. Також зазначено, що учасники без інвалідності перебували ближче до учасників з інвалідністю, ніж до учасників без інвалідності. Всі вони взаємодіяли та спілкувалися один з одним, щоб організувати роботу перед вузьким місцем. Результати проведених досліджень підкреслили важливість вивчення репрезентативних і гетерогенних вибірок у динаміці натовпу. А також виявили необхідність проведення подальших досліджень для кращого зрозуміння динаміки взаємодії між сусідами в натовпі, що покращить валідність інструментів моделювання, таких як моделі руху та евакуації.

Науковцями з Китаю в рамках своїх досліджень евакуації змішаних потоків людей проведено експерименти за участю змішаних груп людей з різними видами інвалідності, враховуючи інвалідність по зору, слуху, фізичні вади, психічні вади, інтелектуальні та особи без інвалідності і їх порівняння з групами людей

похилого віку [42]. Ними проаналізовано особливості руху змішаних потоків людей на горизонтальних шляхах евакуації, а саме коридори. Результати показали, що люди з психічними та інтелектуальними вадами мали вищу швидкість руху ніж решта натовпу. При аналізі отриманих результатів було встановлено, що діапазон щільності змішаного потоку людей з інвалідністю ($0,48\text{--}2,25 \text{ м}^2$) був вужчим ніж у групи літніх людей ($0,27\text{--}2,64 \text{ м}^2$). В одному діапазоні густини різниця у швидкості та питомій потоку між двома групами становила $0,00 \pm 0,09 \text{ м/с}$ і $0,04 \pm 0,11 \text{ (м}\cdot\text{с)}$ - 1 відповідно; збільшується питомий потік змішаної групи людей з інвалідністю ($3,84 \pm 10,67 \%$) порівняно з групою похилого віку. Подальший аналіз показав, що час евакуації змішаного потоку групи людей з інвалідністю обернено пропорційний ширині виходу, така ж залежність, як і для групи літніх людей; потік змішаної групи людей з інвалідністю більший, ніж у людей похилого віку. Для аналізу результатів експерименту, дослідниками створено кругові діаграми. Просторовий розподіл найближчої сусідньої людини для змішаної групи людей з інвалідністю має форму еліпса; із збільшенням щільності, форма просторового розподілу має тенденцію до кругової. Для інвалідів на кріслах колісних та іншої частини потоку, площа просторового розподілу найближчої людини зменшується зі зменшенням ширини виходу. Однак, площа людей на кріслах колісних більша, ніж для інших.

Ще одна група Китайських вчених досліджувала вплив осіб із обмеженою мобільністю на процеси евакуації в приміщенні [43]. Всього в експерименті приймало участь 60 осіб. В експерименті було передбачено різне співвідношення (0 %, 5 % і 10 %) людей різних груп мобільності (групи мобільності М3 та М4, відтворені учасниками експерименту, які не мали інвалідності з використанням допоміжних засобів). Для визначення та відстеження траєкторій руху учасників експерименту використовувалися відеозаписи та алгоритм середньої швидкості. Час евакуації, швидкість, послідовність евакуації та людські потоки аналізувалися за траєкторіями руху. Встановлено, що порівняно з експериментами без наявності осіб з обмеженими можливостями, час евакуації в експериментах із наявністю осіб на кріслах колісних та милицях збільшується, а середня швидкість і питома

витрата зменшуються. Просторовий розподіл отриманий за допомогою аналізу свідчить про те, що скупчення людей без обмежених можливостей біля виходу утворюється повільніше в порівнянні з людським потоком в якому присутні люди, що належать до мало мобільних груп, особливо це виявлялося коли в експерименті приймали участь люди які пересувалися на кріслах колісних.

В ході проведеної роботи українських науковців Хлевно О.В. та Ковалишина В.В. виконано аналіз методів розрахунку часу евакуації, регламентованих чинним законодавством, та встановлено відсутність у нормативних документах та науковій літературі даних, які б відображали закономірності руху змішаного потоку із дітей шкільного віку різних груп мобільності. Обґрунтовано необхідність формування емпіричної бази даних параметрів руху евакуаційних потоків в закладах середньої освіти з інклюзивним навчанням як наукового підґрунтя забезпечення нормування вимог пожежної безпеки до евакуаційних шляхів і виходів у цих закладах.

Важливими аспектами досліджень у їх роботах є врахування різних груп мобільності дітей різного віку, у контексті планування та організації евакуації. Автори роботи [44–47] проаналізували методи розрахунку часу евакуації, які передбачені чинним законодавством. Вони прийшли до висновку, що в нормативних документах та науковій літературі відсутні дані, що відображають закономірності руху змішаного потоку дітей шкільного віку з різними рівнями мобільності.

Проте, цим дослідженням не вдається належним чином звернутися до аспекту евакуації змішаного потоку осіб, які відносяться до різних груп мобільності (М1, М3, М4). Особлива увага при цьому не приділяється випадкам змішаних евакуаційних потоків, де взаємодія осіб із зазначеними різними групами мобільності відбувається при різних відсоткових співвідношеннях.

1.3.2 Аналіз існуючих програмних комплексів для розрахунку часу евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності та проведених наукових досліджень

Однією з найважливіших вимог пожежної безпеки для об'єктів є забезпечення безпечної та своєчасної евакуації людей з будинків та споруд під час пожежі. Достовірне визначення часу евакуації та параметрів шляхів евакуації впливає як на рівень протипожежного захисту об'єкта в цілому так і на забезпечення безпеки людей, що в ньому перебувають. Критерії безпечної евакуації людей є своєчасність і безперешкодність, які перевіряються розрахунками за допомогою математичних моделей, реалізованих з використанням програмного забезпечення.

В останні кілька років моделюванню евакуації людей з приміщень було присвячено багато досліджень. Аналіз існуючих робіт показує, що, в основному, розрахунки проводяться з використанням наступних трьох математичних моделей: спрощеної, імітаційно-стохастичної та індивідуально-поточної моделей [48]. При аналізі було виявлені наступні відмінності, які наведено в таблиці 1.3.

Рух людей під час евакуації вивчався на натурних випробуваннях протягом останніх десятиліть. Методи досліджень були засновані на прямих спостереженнях, фотографіях і плівках відеозаписів. Крім вивчення поведінки, основна мета цих досліджень полягала в розробці комп'ютерних анімаційних реалістичних програм з елементами будівельних об'єктів. Наприклад, люди завжди намагаються знайти найшвидший і простий спосіб дістатися до кінцевого пункту призначення. Якщо можливо, вони уникають обхідних шляхів, навіть якщо найкоротший шлях переповнений. Основним принципом є принцип найменших зусиль, а це означає, що кожен прагне максимально швидко досягти своєї мети, витрачаючи найменшу кількість енергії і часу.

Таблиця 1.3

Врахування закономірностей руху людей під час евакуації у програмних
продуктах

Процеси моделей	Спрощена модель	Імітаційно-стохастична модель	Модель індивідуально-поточного руху
Перетин межі суміжної ділянки шляху	+	+	+
Переформування	-	+	+
Розтікання	-	+	+
Розподіл потоку	+	+	+
Злиття	+	+	+
Неодночасність злиття	-	+	+
Створення та розтікання скупчень	-	+	+
Розщільнення	-	+	+
Врахування варіабельності фізичного і емоційного стану людей	-	*	+
Врахування особливостей вибору людьми маршрутів евакуації	-	-	+
Врахування індивідуальних «сценаріїв» евакуації (виконання інструкцій, завдання ролей)	-	-	+
Врахування протитечії і пересічних потоків	-	+	+

Умовні позначення: + враховуються повністю, - не враховується, * - враховується неповністю у порівнянні з реальними процесами.

Застосування програм в моделюванні руху людських потоків під час евакуації обумовлюється необхідністю відтворення реального різноманіття станів системи, їх поєднань і переходів. На сьогодні існують детерміновані й імовірнісні моделі, за допомогою яких моделюється рух людей по шляхах евакуації при пожежі.

На початку 80-х років минулого століття була розроблена модель ADLPV, яка в рамках сучасної термінології називається імітаційно-стохастичною [5]. Ця модель значно точніша спрощеної аналітичної моделі за рахунок поділу будівлі на елементарні ділянки шириною близько 1 м і виконання кількох розрахункових операцій в секунду для кожної ділянки.

Для реалізації зазначених моделей (спрощеної аналітичної та імітаційно-стохастичної) розроблено програмне забезпечення – модель «Флоутек».

За даним аналізом у всьому світі саме моделі класу «індивідуально-потокowego руху» отримали найбільш широке поширення. Найбільш відомими і перевіреними практикою (офіційно були використані при проектуванні будинків і споруд з масовим перебуванням людей) є моделі SIMULEX [49], Pathfinder [50], STEPS [51], Building Exodus [52].

Зважаючи на вищесказане, оскільки реальний експеримент вимагає значних витрат, іноді як експериментальні дані можуть виступати лише результати реальних пожеж, часом з трагічним результатом, виникає необхідність комп'ютерного моделювання руху людей, наприклад, з метою визначення найкращої геометрії простору, де передбачається скупчення людей, або визначення часу евакуації.

Після проведення аналітичних досліджень [53, 54] було обрано та розглянуто певне програмне забезпечення, що використовується для розрахунку часу евакуації людей з будівель під час пожежі та наведено його стислий опис, переваги, недоліки та особливості.

Building Exodus – програмний комплекс для моделювання евакуації людей з різних типів будівель, який проводиться за допомогою двовимірної просторової сітки для визначення геометрії будівлі (рис. 1.4). Він імітує доволі широкий набір соціально-психологічних особливостей і характеристик людей, таких як вік, стать, швидкість тощо, та враховує ступінь орієнтування людини в будівлі. Він дозволяє моделювати затримку руху, а також в ньому реалізований вплив критичних значень небезпечних чинників пожежі на процес евакуації людей. Комплекс складається з підмодулів, які взаємодіють один з одним для передачі інформації про процес моделювання евакуації людей, даних про геометрію об'єкта, даних про людей, їх рух і поведінку, концентрацію токсичних продуктів горіння, диму та температури [52].

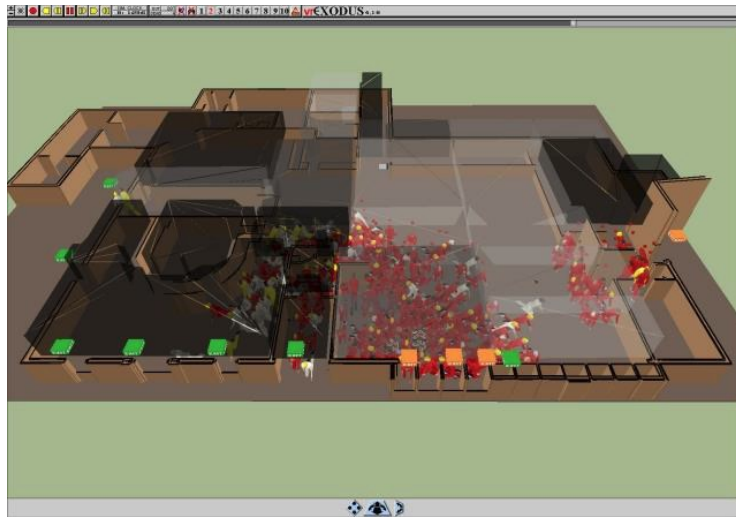


Рисунок 1.4 – Приклад візуалізації результатів розрахунку програми Building Exodus [52]

Simulex – програмний комплекс з можливістю моделювання евакуації людей з будівель зі складною геометрією (рис. 1.5) [49].

Він заснований на визначенні відстані між людьми, від якої залежить їх швидкість руху. Модель дозволяє людям здійснювати обгін, обертання навколо осі тіла, рух боком і рух назад невеликим кроками. Структура моделі – це суцільна просторова сітка. Плани поверхів і сходи розподілені на блоки, що мають решітку розміром $0,2 \times 0,2$ м. Модель містить алгоритм, який розраховує відстань від кожного блоку до найближчого виходу та відображає цю інформацію на плані. Рух кожної людини розглядається індивідуально та відстежується програмою її вихід за межі визначеної розрахункової області, що демонструється під час візуалізації розрахунків. Дозволяється задати рух людей до найближчого виходу за умовчанням або створити окремий маршрут для людини за заданим маршрутом з блокуванням окремих виходів. Програмним комплексом передбачена неявна поведінка агентів, а саме: змінна швидкість руху, рух в бік, обертання навколо осі тіла, обгін та ін., в основі якої закладено результати багатьох відеоспостережень та аналізу результатів окремих спостережень ряду наукових досліджень [49].



Рисунок 1.5 – Приклад візуалізації результатів розрахунку програми Simulex [49]

Програмний комплекс FDS+Evac розроблено Центром Технічних Досліджень Фінляндії VTT (VTT Technical Research Centre of Finland) [55]. EVAC є модулем до Fire Dynamics Simulator (FDS), проводить моделювання процесу евакуації людей, моделювання поведінки людей за допомогою моделі індивідуально-поточного руху людей. Моделювання евакуації повністю інтегрується з процесом моделювання поширення пожежі, дозволяє моделювати різні «сценарії», візуалізує отримані результати та перебіг процесів евакуації і розповсюдження пожежі. Також при моделюванні можливе врахування впливу небезпечних чинників пожежі на процес евакуації.

Через велику кількість функцій, потужний розрахунковий апарат, детальне моделювання і візуалізацію результатів, програмний комплекс має доволі високі вимоги до технічних параметрів обчислювальної техніки та відносно суттєвий час проведення моделювання.

На рис. 1.6 наведено приклад візуалізації результатів розрахунків, за допомогою програмного комплексу FDS+Evac.

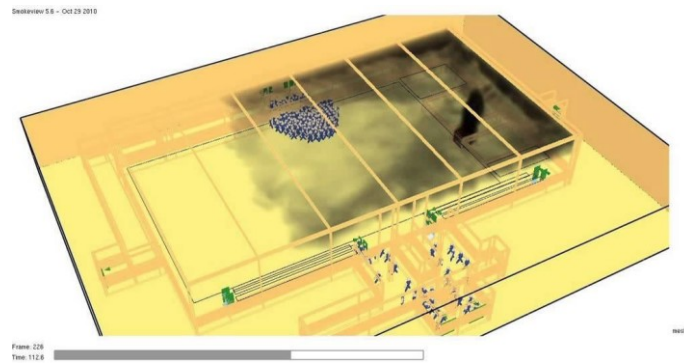


Рисунок 1.6 – Приклад візуалізації результатів розрахунку програми FDS+Evac [55]

Програмний комплекс Evacnet 4 використовується для різних типів будівель, таких як офісні будівлі, стадіони, висотні будівлі, готелі, ресторани і школи. Основним завданням моделі є оптимізація евакуації з будівлі для мінімізації часу евакуації [56].

Тип моделі – модель руху. Модель поведінки агентів непередбачена.

Програмний комплекс PedGo призначений моделювання руху натовпу людей, моделювання евакуації людей з будівель, кораблів, літаків та інших видів громадського транспорту [57].

Структура моделі: «дрібна сітка», яка розподіляє поверх на сітку розміром $0,4 \times 0,4$ м і являє собою простір, що займає людина. Стіни, меблі та інші перешкоди постійно зайняті сіткою в процесі моделювання. Поведінка людини неявна. Кожна людина в моделі представлена індивідуально з можливістю вибору маршрутів руху. Модель пропонує перед початком розрахунків задати для людей певні характеристики, такі як: затримка перед початком евакуації, час очікування, реагування, бездіяльність, вплив. Цей набір параметрів використовується для опису характеристик поведінки людей і призначається окремим з них в процесі моделювання за нормальним розподілом. Два з цих параметрів, час затримки і вплив, є стохастичними.

Програмний комплекс Pathfinder [50] призначений для моделювання евакуації людей з будівель під час надзвичайних ситуацій, зокрема пожеж. Він забезпечує швидкий і реалістичний розрахунок часу евакуації, використовуючи

індивідуально-потоківу модель руху [5], що відповідає нормативним вимогам. Pathfinder також дозволяє моделювати рятування немобільних людей зусиллями персоналу, надаючи різні сценарії поведінки рятувальників. Програма підтримує одночасний перегляд результатів евакуації та розповсюдження небезпечних чинників пожежі, що дозволяє оцінити, чи встигають люди евакуюватися до блокування шляхів.

За допомогою подібних зображень можливо наочно продемонструвати, чи встигають люди евакуюватися до моменту блокування шляхів евакуації. Для цього необхідно завантажити результати розрахунків в PyroSim [58] з перерізами – температура, щільність диму, дальність видимості і ін. Перерізи можливо налаштовувати індивідуально та задавати їм діапазони значень і параметри кольору їх шкали.

Для наочного і зручного відображення результатів моделювання можливо використовувати «контури» – поля різних параметрів руху, наприклад, щільність агентів. Наявна у програмному комплексі анімація забезпечує перегляд результатів у режимі реального часу. Контури дозволяють відображати щільність, швидкість, завантаженість шляхів евакуації і інші величини, також можливо створювати контури користувача, використовувати середнє значення, пошук максимальних і мінімальних значень. Кожен контур можливо налаштовувати індивідуально, наприклад, діапазон значень, шкала кольору, згладжування і ін.

Програмний комплекс Pathfinder дозволяє імпортувати із системи AutoCAD файли в форматах DXF і DWG. Спеціальний інструмент для видалення приміщень дозволяє швидко і легко використовувати імпортовану геометрію для створення простору для переміщення агентів в моделі евакуації. Крім того, можливо використовувати імпортування даних із Fire Dynamics Simulator (FDS) і PyroSim. Pathfinder також дозволяє завантажувати зображення в форматах GIF, JPG або PNG у якості підложки, що допомагає швидко створювати об'єкти на її основі.

Для відображення геометрії моделі Pathfinder використовує тривимірну сітку. У результаті цього можливо детально відображати будь-які геометричні

деталі та криві. Трикутна сітка полегшує безперервний рух людей по всій моделі в порівнянні з іншими програмами для розрахунків, які розподіляють простір на ячейки, що штучно обмежують рух.

У Pathfinder кожен агент автоматично використовує кілька параметрів для вибору шляху до виходу: час очікування біля дверей, оцінка часу до виходу, і пройдена відстань. Агенти динамічно реагують на зміни довжини черги, відкриття/закриття дверей, і зміну модифікаторів швидкості, таких як дим чи перешкоди. Користувач може налаштовувати пріоритетність параметрів, наприклад, ігнорування черг чи визначення конкретних цілей і виходів. Pathfinder також підтримує моделювання використання ліфтів, із задаванням поверхів посадки і висадки. Ліфти можуть керуватися рятувальниками та об'єднуватися в групи.

В Pathfinder сходи і рампи можливо створювати доволі легко. Їх можливо використовувати для моделювання ескалаторів і доріжок, що рухаються (похилих і горизонтальних).

Кожна людина в моделі є агентом з особистим профілем (у якому встановлюється розмір людини і швидкість його руху) і особистою поведінкою (рух до виходів, точкам шляху і ліфтам). На основі визначених індивідуальних характеристик кожен агент проводить оцінювання навколишнього середовища і обирає шлях для виходу. Наприклад, люди можуть динамічно уникати довгих черг або реагувати на закривання дверей.

Є можливість створення різних профілів людей, при цьому параметри в профілі можуть бути задані постійними, а також з рівномірним, нормальним або логонормальним розподілом. Наприклад, можна створити профілі, які моделюють дітей і дорослих, а потім розподілити їх між агентами в будь-якому відношенні. Аналогічно можна створювати і розподіляти безліч різноманітних типів поведінки. Люди можуть рухатися до різних виходів, відвідувати задані точки шляху і чекати заданий час.

Pathfinder дозволяє моделювати достатньо складні ситуації. Наприклад, використовувати двері з заданою пропускною спроможністю, точки шляху і час

очікування, можливо моделювати чергу і процес руху через турнікети. Працівників рятувальних служб можливо направляти по сходах проти течії евакуації. Наявна можливість змоделювати, яким чином вони рухаються до визначеного місця, чекають заданий час перед тим як рухатися далі. Для моделювання зміни навколишнього середовища під час евакуації можна використовувати двері і модифікатори швидкості для приміщень.

Відображення тривимірних результатів можливе як під час моделювання (для перегляду поточного стану), так і після завершення розрахунку. Тривимірна візуалізація дозволяє користувачу спостерігати за рухом людей, перемотувати запис вперед і назад, переглядати шляхи руху і обирати агентів для спостереження. В файлі «резюме» виводиться інформація про мінімальний, максимальний і середній час руху до виходу, а також про першу і останню людину, що пройшла через двері і приміщення. Програмний комплекс Pathfinder дозволяє отримати всю необхідну інформацію для розрахунку ризику: час евакуації, час початку евакуації, час існування скупчень людей.

Більш детальну інформацію про параметри руху людей при розрахунку їх руху наведено в файлах CSV, у тому числі про рух окремих людей.

Зображення основного робочого вікна програмного комплексу Pathfinder наведено на рис. 1.7.

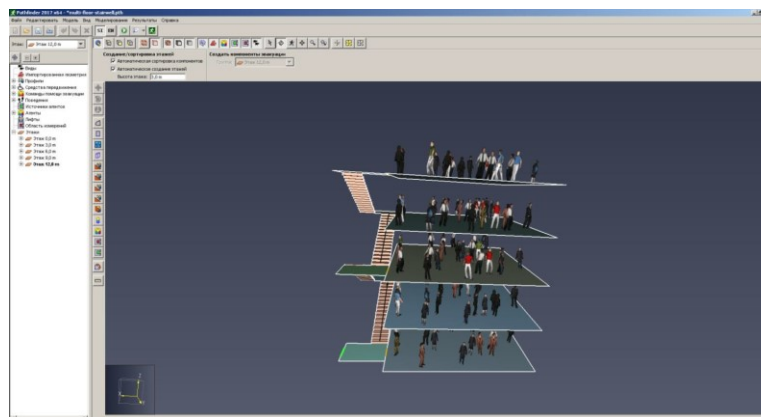


Рисунок 1.7 – Зображення основного робочого вікна програмного комплексу Pathfinder [50]

У вище описаному дослідженні здобувач вивчив наявні програми для обчислення часу евакуації людей під час пожежі. Проведено порівняльний аналіз наявних програмних комплексів, що здійснюють розрахунки в цій області. Проведено порівняльний аналіз математичних методів, які використовуються для опису руху людей під час пожежі у різних програмах. Узагальнено висновки щодо функціональності розглянутих програмних комплексів [59]. Основна мета ще одного дослідження полягала в аналізі обмежень відтворення програмою поведінки людей з обмеженими можливостями. Аналізи включали дослідження шести сценаріїв евакуації з будівель. У цій розвідці наголошувалось на трьох програмах: SIMULEX, STEPS і Pathfinder. Проведено моделювання різних варіацій людей з порушенням мобільності та порівняння методологій застосування цих програм. Результати дослідження показали значні відмінності у використанні цих трьох програм, навіть за однакових вихідних даних. Різниця в загальному часі евакуації сягала 8 % [60].

Науковці з Китаю в межах досліджень евакуації змішаних потоків людей провели серію симуляцій, виконаних на пішохідних маршрутах, зокрема людей на кріслах колісних, які проходять через вузькі воронкоподібні місця з діапазоном кутів від 0° до 90° , симуляцію здійснили за допомогою програмного забезпечення «Pathfinder». Результати цих симуляцій порівнювалися з попередніми експериментами для вивчення впливу кутів на ефективність та проблем, пов'язаних із Pathfinder.

Симуляції показали, що під кутом 45° спостерігається більша ефективність та менше заторів. Однак порівняно з попередніми експериментальними результатами середня швидкість руху візків складає на $0,224 \pm 0,028$ м/с менше, час евакуації збільшується, а ефективність руху та затори під кутами 0° та 45° виявили різницю в симуляціях під великою кількістю інвалідних візків. Проблеми також включають часті обгони та меншу відстань до країв у симуляціях. Ці висновки вказують на можливість покращення ефективності трафіку на транспортних станціях і точність моделювання руху пішоходів, зокрема користувачів інвалідних візків [61].

Науковці з Великобританії у своїй роботі провели дослідження щодо того, як персоналізовані інструкції з евакуації надаються кожному мешканцю багатоповерхового житлового будинку. Зазначене може допомогти пришвидчити евакуацію під час пожежі. Ця наукова розвідка здійснена на основі тематичних досліджень, використовуючи Pathfinder. Під час моделювання евакуації з одинадцятиповерхового житлового будинку в Каїрі, Єгипет, застосовано обмеження для імітування евакуйованих осіб у Pathfinder. Ці обмеження містили використання певних маршрутів виходу, а також індивідуальних інструкцій щодо евакуації реальним людям через їх смартфони. Результати моделювання свідчать, що ліфти для людей з обмеженою рухливістю можуть використовувати особи, які мешкають у будівлі. Це може призвести до неочікуваного переповнення ліфтів. Завдяки оптимально налаштованим інструкціям час евакуації скоротився в середньому на 17,6 хв (майже 50%) порівняно з моделюванням, що враховує вибір маршруту на підставі стандартних факторів планування, таких як довжина маршруту, наявність натовпу та видимі загрози. Індивідуальні інструкції щодо евакуації через смартфони дали змогу мешканцям швидше вибрати альтернативні маршрути виходу. Дослідження показали, що такі індивідуальні інструкції сприяють зменшенню негативних наслідків щодо переповнення та нерівномірного розподілу людей під час евакуації вертикальними та горизонтальними маршрутами [62].

Корейські науковці здійснили дослідження, для розрахунку якого використовувався симулятор динаміки розвитку пожежі FDS (Fire Dynamics Simulator). Проведено оцінку часу безпечної евакуації (ASET), коли евакуація стає неможливою через початок розгортання вогню, у разі стаціонарних пацієнтів лікарень для людей похилого віку. Також розраховано час безпечної евакуації (RSET), тобто час, необхідний для переміщення до безпечного місця, на основі даних про швидкість евакуації пацієнтів за допомогою програмного забезпечення «Pathfinder». Під час розвідки розглянуто різні шляхи евакуації, такі як сходи, ліфти та пандуси, у поєднанні з розгортанням схеми руху. Згідно з оцінкою ефективності евакуації вибір шляху евакуації та схема руху мають вплив на

кількість постраждалих серед різних груп пацієнтів. З'ясовано, що використання пандусів для евакуації зменшує кількість смертей порівняно з використанням сходів або ліфтів. Такий вибір шляху евакуації під час пожежі в лікарні для людей похилого віку виявився більш безпечним для вразливих осіб [63].

Група китайських вчених провела обчислення та моделювання евакуації в приміщенні за 15 сценаріями, до яких залучали різну кількість осіб (20, 40 і 60). Траєкторії та координати агентів отримували в реальному часі. Встановлено, що зі зростанням частки пішоходів з обмеженими можливостями індивідуальний час евакуації агентів збільшується. Ця тенденція узгоджувалася з результатами попереднього контрольованого експерименту. Середня швидкість евакуації агентів негативно впливала на змішану частку осіб з обмеженими можливостями. Фундаментальні діаграми, отримані за допомогою моделювання, були подібні до експериментальних результатів. Виявлено, що присутність людей з обмеженими можливостями у сценарії зумовлює більшу щільність у натовпі порівняно зі сценаріями без інвалідності. Зі збільшенням частки пішоходів з обмеженими можливостями зростає небезпека у натовпі людей, що підтверджує експериментальні висновки. Ці висновки корисні для безпечної евакуації за допомогою комп'ютерного дизайну для зменшення різноманітних скупчень натовпу під час евакуації з будівлі в разі пожежі [64].

Українські вчені С.В. Цвіркун та А.І. Березовський під час досліджень провели моделювання незадимлюваних сходових кліток за допомогою польової математичної моделі в програмно-обчислювальному комплексі FDS та розраховали час евакуації людей з навчальної аудиторії за допомогою комп'ютерної моделі, виконаної у програмі Pathfinder, з порівнянням цих результатів із результатами, отриманими під час натурного експерименту [65, 66].

Р.І. Майборода, Ю.А. Отрош, Н.В. Рашкевич, Р.С. Мележик в своїй роботі дослідили актуальний стан проблеми евакуації маломобільних груп населення з висотних житлових будівель під час пожежі. Обґрунтували можливість безпечної самостійної евакуації цих груп населення з використанням пожежних ліфтів. Провели математичні та графічні розрахунки часу евакуації людей за допомогою

програмного комплексу Pathfinder з використанням або без використання пожежних ліфтів та надали пропозиції щодо евакуації маломобільних груп населення з висотних житлових будівель [67].

Під час наукових розвідок О.В. Хлевний та В.В. Ковалишин здійснили аналіз методів розрахунку часу евакуації, які передбачені чинним законодавством. Вони визначили, що нормативні документи та наукова література не містять даних про закономірності руху змішаного потоку дітей шкільного віку з різними рівнями мобільності. У своїй роботі [44–47] автори зосередились на врахуванні різних груп мобільності дітей різного віку у плануванні та організації процесу евакуації. Вони вказали на брак даних про закономірності руху змішаного потоку дітей шкільного віку з різними рівнями мобільності як у нормативних документах, так і в науковій літературі. Отже, з'ясувалося, що є обґрунтована потреба у створенні емпіричної бази даних щодо параметрів руху евакуаційних потоків у закладах середньої освіти з інклюзивним навчанням для наукового обґрунтування вимог пожежної безпеки до евакуаційних шляхів та виходів у цих установах.

Проте у цих дослідженнях не приділено достатньої уваги аспекту моделювання евакуації змішаного потоку людей, зокрема осіб різних груп мобільності М1, М3, М4, у контексті змішаних евакуаційних потоків.

1.4. Висновки за розділом

1. У ході проведеного дослідження було проаналізовано сучасний стан пожежної безпеки в ТРЦ, що підкреслює їхню важливість у контексті сучасного суспільства. Встановлено, що оптимальний вибір систем протипожежного захисту безпосередньо впливає на рівень пожежної безпеки, особливо з огляду на специфіку планування ТРЦ, які характеризуються великою відвідуваністю та складними архітектурними рішеннями.

2. Нормативні документи, що регулюють евакуаційні шляхи та виходи, акцентують увагу на необхідності доступності для маломобільних груп населення. Ці стандарти є критично важливими для забезпечення безпеки всіх

категорій громадян під час надзвичайних ситуацій, таких як пожежі. Водночас існують суттєві проблеми, пов'язані з евакуацією маломобільних груп населення, зокрема недостатня кількість адаптованих евакуаційних шляхів, відсутність пандусів та ліфтів, а також недостатнє врахування специфіки руху таких осіб під час евакуації.

3. Особливу увагу необхідно приділити удосконаленню розрахункового методу визначення тривалості евакуації людей у торговельно-розважальних центрах з урахуванням наявності маломобільних осіб. Це дозволить створити більш точні прогнози часу евакуації, що є критично важливим для планування ефективних заходів безпеки.

4. Аналіз виявив, що проведення експериментальних досліджень щодо евакуації людей різних груп мобільності є важливим завданням, яке дозволить створити емпіричну базу для вдосконалення систем евакуації. Комп'ютерне моделювання експериментальних досліджень евакуації різних груп мобільності дозволить краще зрозуміти вплив щільності людського потоку на швидкість евакуації, що, у свою чергу, сприятиме удосконаленню методик визначення розрахункового часу евакуації.

5. Необхідність проведення натурних спостережень у реальних умовах ТРЦ стане основою для формулювання рекомендацій щодо проведення навчальних евакуацій, що дозволить підвищити ефективність евакуаційного процесу.

РОЗДІЛ 2 ОБҐРУНТУВАННЯ МОДЕЛЕЙ І МЕТОДІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ЕВАКУАЦІЇ ІЗ ТОРГОВЕЛЬНО-РОЗВАЖАЛЬНИХ ЦЕНТРІВ

На сьогоднішній день, [5] є основним документом, що регулює процедури розрахунку часу евакуації із будівель різного призначення та встановлює використання різних методів та моделей для точного визначення часу евакуації людей.

Ключовими параметрами руху евакуаційного потоку є його щільність, швидкість та інтенсивність. Для визначення цих показників потрібно провести ряд натурних спостережень в ТРЦ, де існує висока можливість перебування серед відвідувачів людей, що відносяться до мало мобільних груп населення, та створити статистичну базу емпіричних даних. У цьому розділі проведено аналіз діючих методик розрахунку часу евакуації та описано підходи, за якими будуть визначатись необхідні параметри евакуації на основі реальних спостережень.

2.1 Моделі і методи для визначення часу евакуації із торговельно-розважальних центрів

Обґрунтування моделей і методів для визначення часу евакуації з ТРЦ враховує складність структури об'єктів, різноманітність зон, високу щільність відвідувачів та динаміку їх руху. Моделі повинні аналізувати оптимальне розташування виходів, враховувати різні сценарії евакуації та фізичні можливості відвідувачів. Обрання підходів залежить від конкретних характеристик ТРЦ.

2.1.1 Класифікація моделей евакуації людей у разі пожежі

Класифікація моделей евакуації людей у разі пожежі змістовно викладено у ряді наукових досліджень [47] та нормативно-технічних документів, які визначають методи та підходи до моделювання та аналізу процесів евакуації. Серед них можна виділити роботи вчених, таких як В. В. Ковалишин, О.В. Хлевной, С.В. Цвіркун, О.М. Тесленко, В.В. Ніжник та інші, а також документи,

що регулюють стандарти та вимоги щодо пожежної безпеки, зокрема [5]. В цих джерелах подається систематизована інформація щодо різних типів моделей, їхніх

Більшість моделей, що описують рух людей у евакуаційних потоках, базуються на математичних функціях. Ці моделі можна узагальнити у дві основні групи: математичні та психологічні моделі.

Психологічні моделі обмежені у використанні, перш за все, через недостатнє вивчення особливостей поведінки людей в ситуаціях під час пожежі, що пояснюється складністю проведення експериментів. Отже, для розрахунку часу евакуації з будівель і споруд частіше використовуються математичні моделі. Вони, в свою чергу, можуть бути класифіковані як емпіричні, аналогові та системні.

Емпіричні математичні моделі базуються на результатах обширних натурних спостережень і відображають виявлені закономірності. Завдяки своїй точності у розрахунках, вони є найбільш розповсюдженими. Емпіричні моделі можна розділити на дві групи:

Моделі, що відображають загальні особливості руху людських потоків.

Ці моделі розглядають загальні характеристики змішаних потоків людей. Перші такі моделі з'явилися після Другої світової війни у Великобританії, як відповідь на необхідність опису процесів евакуації цивільного населення під час бомбардувань міст. Однак недоліком цих моделей є їхня відсутність універсальності, іноді вони можуть бути ефективними для деяких будівель, але непридатними для інших.

Моделі, що відображають індивідуальні особливості учасників руху.

Ці моделі виникли внаслідок неможливості точного розрахунку для осіб з особливими потребами, виявленої попередньою групою моделей. Вони дозволяють враховувати фізичні особливості людей з особливими потребами та необхідність залучення інших осіб для їхнього пересування. Однак, подібно до попереднього випадку, основним недоліком таких моделей є їхня обмежена застосовність для різних типів об'єктів, і для кожного конкретного типу будівлі необхідно розробляти окрему модель.

Аналогові моделі використовують закономірності, які описують інші динамічні системи, для надання аналогій особливостей руху людських потоків, таких як рівняння гідравліки або механіки. Прикладами цієї групи є моделі, що базуються на теорії графів, моделі, які використовують принципи магнетизму, та кінетичні моделі.

Прикладом такої аналогової моделі є спрощена аналітична модель руху, яка регламентується [5]. Однак недоліком цієї групи моделей є неможливість врахування початкового етапу евакуації та руху різнонаправлених потоків на ділянках.

Системна модель представляє собою сукупність взаємопов'язаних підсистем, кожна з яких виконує конкретну функцію. Зазвичай такі моделі потребують використання комп'ютерної техніки, і розвиток інформаційних технологій дозволяє створювати складні системи для точних розрахунків. Прикладом системної моделі є індивідуально-потокова модель, рекомендована для використання за [5]. Недоліками таких моделей є їхня складність, потреба в потужному комп'ютерному обладнанні, і часові затрати на розрахунки, виконані за допомогою таких програм.

Описані моделі можна умовно поділити на мікроскопічні (індивідуальні) та макроскопічні (поточні). У мікроскопічних моделях кожна людина розглядається окремо, що дозволяє враховувати індивідуальні характеристики учасників евакуації, такі як маса, зріст, вік, стать, швидкість, роль в процесі евакуації та інші. У макроскопічних моделях розглядається лише рух ваги людей з певними характеристиками, такими як щільність учасників і середня швидкість пересування групи. Перші моделі руху людей були макроскопічними і описували зміни щільності і швидкості в часі [68, 69]. Зазвичай вони були детермінованими і безперервними, зокрема визначали зміни щільності та швидкості людей в зазначений час.

Перший підхід включає моделі, що базуються на гідродинаміці та молекулярно-кінетичній теорії, такі як ті, які були розроблені Д. Хелбінгом [70]. Основною недолікою цих моделей є їхня неспроможність адекватно описати рух

людських потоків при низьких щільностях, таких як у приміщеннях з розвиненою внутрішньою інфраструктурою, наприклад, лекційні та глядацькі зали, навчальні класи, торгові зали і т. ін.

До макромоделей також відносяться потокова модель першого порядку, модель Бруно [71], модель Коломбо-Росіні [72] та інші. Однак із розвитком обчислювальної техніки значний інтерес привернули мікроскопічні моделі. Однією з перших та відомих є модель соціальних сил, в якій взаємодія між окремими частинками відбувається через використання концепції соціальної сили або соціального поля. Ця модель входить до категорії детермінованих і безперервних моделей. Залежно від динаміки руху людей, соціальна сила враховує вплив оточення, відповідальну за величину прискорення кожної частки. Рух частинок описується рівнянням 2-го закону Ньютона. Частковим аналогом моделі соціальних сил є модель оптимальної швидкості, де враховуються лише відхилення швидкості від бажаної через наявність інших людей на шляху, а вплив людей, які стоять перед нами, виражений сильніше.

На сучасний момент багато дослідників погоджуються з твердженням, що стрімкий розвиток інформаційних технологій вимагає розробки зовсім нових підходів до моделювання евакуаційних процесів [73]. Більшість існуючих моделей ґрунтуються на принципах, сформованих в той період, коли потужності обчислювальних машин були обмеженими. Отже, не зважаючи на наявність великої кількості моделей руху людських потоків, розробка нових підходів залишається надзвичайно актуальною.

2.1.2 Обґрунтування вибору моделі для проведення розрахунків

Відповідно до вимог [5], час евакуації з різних типів будівель та споруд визначається за допомогою трьох розрахункових методів.

Спрощена аналітична модель. Модель дозволяє проводити розрахунки без залучення комп'ютерної техніки, є потоковою (модель макрорівня) і має свої обмеження, про які вже було зазначено. Визначення розрахункової тривалості евакуації людей (t_p) у такому випадку виконується для всіх можливих потоків, а

підсумкове значення тривалості евакуації визначається за даними потоку, для якого тривалість евакуації є найбільшою.

Під час проведення розрахунків, шлях від місця початку руху до виходу у безпечну зону розділяється на невеликі прості ділянки, такі як проходи, коридори, дверні прорізи, сходові марші, тамбури, пандуси і т.ін. Кожна з цих ділянок характеризується такими параметрами, як довжина l_i та ширина b_i . Початковими прпростими ділянками можуть бути проходи між обладнанням, робочими місцями, меблями тощо, в залежності від типу та призначення приміщення чи будівлі. У ТРЦ розрахунок зазвичай розпочинають з проходів між торговельними рядами або павільйонами.

Значення довжини і ширини цих простих ділянок визначаються на підставі фактичних замірів або відповідно до проєктної документації. Довжину похилих ділянок, таких як сходи чи пандуси, визначають на основі планів поверхів та кутів нахилу. Довжину дверних прорізів, які розташовані у стінах товщиною до 0,7 м, у розрахунках ігнорують, вважаючи її рівній 0. У випадку, якщо товщина стіни перевищує 0,7 м, такі відмітки розглядають як самостійні горизонтальні ділянки.

Для кожного потоку розрахункова тривалість евакуації t_p визначається шляхом суми значень тривалості руху по кожній з цих ділянок:

$$t_p = t_1 + t_2 + \dots t_i, \quad (2.1)$$

де t_1 – тривалість руху на первинній ділянці; $t_2, \dots t_i$ – тривалість руху потоку на наступних після першої ділянках.

Тобто якщо учасники евакуації рухаються по паралельних ділянках (наприклад, у магазині – паралельні проходи між торговельними рядами рядами або вітринами), то при обчисленні сумарної тривалості евакуації не сумуються значення тривалості руху на кожній із ділянок. Замість цього обирається максимальне значення тривалості серед отриманих.

Тривалість руху потоку t_1 на початковій евакуаційній ділянці розраховується за формулою:

$$t_1 = \frac{l_1}{V_1}, \quad (2.2)$$

де l_1 – довжина первинної евакуаційної ділянки шляху, м; V_1 – швидкість руху людського потоку по горизонтальному шляху на першій ділянці, м/хв (визначається залежно від щільності D).

На початковій ділянці щільність потоку D_1 розраховується відповідно до формули:

$$D_1 = \frac{N_1 \cdot f}{l_1 \cdot b_1}, \quad (2.3)$$

де N_1 – кількість людей на первинній ділянці. Для ТРЦ – кількість відвідувачів, що евакуюються через один прохід між рядами столів; f – середня площа горизонтальної проекції людини, м²/люд; b_1 – ширина первинної ділянки, м.

На підставі розрахованого значення щільності потоку D_1 з таблиці 2.1 визначають значення інтенсивності руху потоку на початковій ділянці q_1 .

Під час переходу з початкової ділянки на наступні, швидкість руху людського потоку визначається згідно з таблицею 2.1, виходячи зі значень інтенсивності руху потоку V_1 на кожній ділянці. Для кожної ділянки, за винятком початкової (включаючи дверні прорізи), інтенсивність розраховується за наступною формулою:

$$q_i = \frac{q_{i-1} \cdot b_{i-1}}{b_i}, \quad (2.4)$$

де b_i , b_{i-1} – ширина розрахункової ділянки та ділянки, яка їй передує, відповідно; q_i , q_{i-1} – інтенсивність руху потоку розрахунковою ділянкою та ділянкою, яка їй передує, відповідно.

Для дверних отворів з шириною більше 1,6 м, інтенсивність руху при щільності потоку понад 0,9 приймається за фіксованим значенням 8,5 м/хв. При меншій ширині прорізу інтенсивність слід розраховувати за формулою $q=2,5+3,75 \cdot b$. У випадках, коли значення інтенсивності q не перевищує значення $q_{\max}$, тривалість руху на даній ділянці шляху t_i визначається:

$$t_i = \frac{l_i}{V_i}, \quad (2.5)$$

Таблиця 2.1

Інтенсивність і швидкість руху людського потоку на різних ділянках шляхів евакуації в залежності від щільності для групи мобільності М1, М3, М4 [5]

Група мобільності	Вид шляху										
	$D, \text{ м}^2/\text{м}^2$	Горизонтальний		Сходи вниз		Сходи вверх		Пандус вниз		Пандус уверх	
		$V, \text{ м/хв}$	$q, \text{ м}^2/\text{м} \cdot \text{хв}$	$V, \text{ м/хв}$	$q, \text{ м}^2/\text{м} \cdot \text{хв}$	$V, \text{ м/хв}$	$q, \text{ м}^2/\text{м} \cdot \text{хв}$	$V, \text{ м/хв}$	$q, \text{ м}^2/\text{м} \cdot \text{хв}$	$V, \text{ м/хв}$	$q, \text{ м}^2/\text{м} \cdot \text{хв}$
М1	0,01	100	1,0	1,0	100	1,0	60	0,6	100	1,0	1,0
	0,05	100	5,0	5,0	100	5,0	60	3,0	100	5,0	5,0
	0,1	80	8,0	8,7	95	9,5	53	5,3	80	8,0	8,7
	0,2	60	12,0	13,4	68	13,6	40	8,0	60	12,0	13,4
	0,3	47	14,1	16,5	52	15,6	32	9,6	47	14,1	16,5
	0,4	40	16,0	18,4	40	16,0	26	10,4	40	16,0	18,4
	0,5	33	16,5	19,6	31	15,6	22	11,0	33	16,5	19,6
	0,6	28	16,3	19,05	24,5	14,1	18,5	10,75	28	16,3	19,05
	0,7	23	16,1	18,5	18	12,6	15	10,5	23	16,1	18,5
	0,8	19	15,2	17,3	13	10,4	13	10,4	19	15,2	17,3
	0,9	15	13,5	8,5	8	7,2	11	9,9	15	13,5	8,5
М3	0,01	70,00	0,70	20,00	0,20	25,00	0,25	105,00	1,05	55,00	0,55
	0,05	70,00	3,50	20,00	1,00	25,00	1,25	105,00	5,25	55,00	2,75
	0,1	70,00	7,00	20,00	2,00	25,00	2,50	105,00	10,50	55,00	5,50
	0,2	53,50	10,70	20,00	4,00	20,57	4,11	83,41	16,68	45,54	9,11
	0,3	43,57	13,07	16,67	5,00	17,05	5,12	65,70	19,71	35,59	10,68
	0,4	36,52	14,61	14,06	5,62	14,56	5,82	53,13	21,25	28,54	11,41
	0,5	31,05	15,53	12,04	6,02	12,62	6,31	43,39	21,69	23,06	11,53
	0,6	26,59	15,95	10,38	6,23	11,04	6,62	35,42	21,25	18,59	11,15
	0,7	22,81	15,97	8,98	6,29	9,70	6,79	28,69	20,08	14,81	10,37
	0,8	19,54	15,63	7,77	6,21	8,54	6,83	22,86	18,28	11,53	9,23
	0,9	16,65	14,99	6,70	6,03	7,52	6,77	17,71	15,94	8,64	7,78
М4	0,01	60,00	0,60	-	-	-	-	115,00	1,15	40,00	0,40
	0,05	60,00	3,00	-	-	-	-	115,00	5,75	40,00	2,00
	0,1	60,00	6,00	-	-	-	-	115,00	11,50	40,00	4,00
	0,2	50,57	10,11	-	-	-	-	99,65	19,93	35,17	7,03
	0,3	40,84	12,25	-	-	-	-	79,88	23,97	28,36	8,51
	0,4	33,93	13,57	-	-	-	-	65,86	26,34	23,52	9,41
	0,5	28,58	14,29	-	-	-	-	54,98	27,49	19,77	9,89
	0,6	24,20	14,52	-	-	-	-	46,09	27,65	16,71	10,03
	0,7	20,50	14,35	-	-	-	-	38,57	27,00	14,12	9,88
	0,8	17,30	13,84	-	-	-	-	32,06	25,65	11,88	9,50
	0,9	14,47	13,02	-	-	-	-	26,32	23,68	9,90	8,91

У випадку, якщо розрахункова інтенсивність q перевищує максимально допустиме значення $q_{\max}$, то, за можливості, необхідно збільшити ширину b_i ділянки до такого значення, при якому буде виконуватися умова:

$$q_i \leq q_{\max}, \quad (2.6)$$

Це можна реалізувати на етапі будівництва або реконструкції. У випадку, якщо об'єкт вже діє, необхідно вибрати значення швидкості та інтенсивності з таблиці 2.1, які відповідають щільності потоку $D = 0,9$ і вище. Крім цього, потрібно розрахувати тривалість затримки через скупчення на ділянці, використовуючи наступну формулу:

$$t_3 = N \cdot f \cdot \left(\frac{1}{q(D=0,9) \cdot b_{i-1}} - \frac{1}{q_{i-1} \cdot b_i} \right), \quad (2.7)$$

де q_{i-1} – інтенсивність руху евакуаційних потоків, що зливаються на початку i -ї ділянки, м/хв; b_{i-1} – ширина ділянок шляху злиття, м; b_i – ширина розглянутої ділянки шляху, м.

Для різних ділянок шляху допустимі значенні інтенсивності руху $q_{\max}$ становлять:

- для горизонтальних ділянок $q_{\max} = 16,5$ м/хв;
- для дверних прорізів $q_{\max} = 19,6$ м/хв;
- для сходів вгору $q_{\max} = 11,0$ м/хв;
- для сходів вниз $q_{\max} = 16,0$ м/хв.

Якщо в певному місці шляху об'єднуються два чи більше потоків, інтенсивність руху на ділянці, що безпосередньо слідує за злиттям, слід розраховувати за допомогою формули:

$$q_i = \frac{\sum q_{i-1} \cdot b_{i-1}}{b_i}. \quad (2.8)$$

Індивідуально-потокова модель. Модель індивідуально-потокового руху є моделлю макрорівня, яка враховує індивідуальні особливості кожного учасника евакуації. При визначенні тривалості евакуації за цією моделлю остаточний результат визначається часом, коли останній учасник покидає будівлю.

Розрахунок починається зі складання розрахункової схеми евакуації. Так само, як і при використанні спрощеного аналітичного методу, всі шляхи евакуації поділяються на прості ділянки розмірами $a \times b$.

Для кожного учасника евакуації, залежно від групи мобільності, вихідні дані для розрахунку включають площу горизонтальної проекції та координату x_i , що показує відстань учасника до кінця ділянки (рис. 2.1). Початкові координати визначаються згідно зі схемою розміщення людей у приміщенні. Наприклад, для навчального класу закладу середньої освіти схема розміщення на початку часу відображає положення учнів за робочими столами у класі. У випадку відсутності даних про меблі або обладнання приймається рівномірне розміщення учасників евакуації на всій площі приміщення (первинній ділянці).

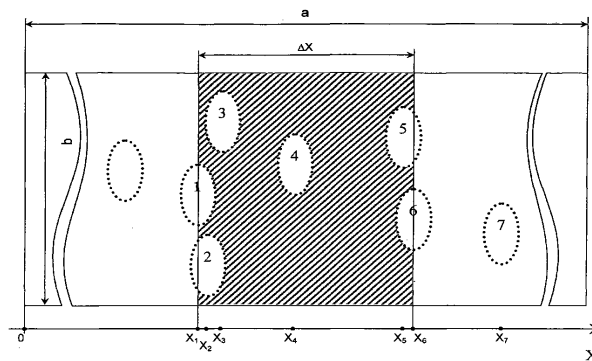


Рисунок 2.1 – Координатна схема розміщення учасників руху на шляхах евакуації [5]

Координата кожного учасника в момент часу t визначається за формулою:

$$x_i(t) = x_i(t-\Delta t) - V_i(t) \cdot \Delta t \text{ м}, \quad (2.8)$$

де $x_i(t-\Delta t)$ – координата i -го учасника в попередній момент часу, м;
 $V_i(t)$ – швидкість i -го учасника в момент часу t , м/с; Δt – проміжок часу, с.

Швидкість i -го учасника $V_i(t)$ у момент часу t визначається за таблицею 2.1 в залежності від локальної щільності потоку, у якій вона рухається, $D_i(t)$ і типу евакуаційної ділянки.

Локальна щільність $D_i(t)$ обчислюється по групі, що складається з n учасників, за формулою:

$$D_i(t) = (n(t) - 1) \cdot \frac{f}{(b-\Delta x)} \text{ м}^2/\text{м}^2, \quad (2.9)$$

де n – кількість людей у групі, люд.; f – середня площа горизонтальної проекції людини, м^2 ; b – ширина евакуаційної ділянки, м; Δx – різниця координат останнього та першого учасника в групі, м.

Якщо в момент часу t координата учасника $x_i(t)$, визначена за формулою (2.8), стане від'ємною – це означає, що учасник досяг межі поточної евакуаційної ділянки та має перейти на наступну евакуаційну ділянку.

У цьому разі координата цього учасника на наступній евакуаційній ділянці визначається за формулою:

$$x_i(t) = [x_i(t-dt) - V_i(t) \cdot dt] + a_k - l_k \text{ м}, \quad (2.10)$$

де $x_i(t-dt)$ – координата i -го учасника в попередній момент часу на $(k-1)$ евакуаційній ділянці, м; $V_i(t)$ – швидкість i -ї людини на $(k-1)$ евакуаційній ділянці в момент часу t , м/с; a_k – довжина k -ї евакуаційної ділянки, м; l_k – координата місця злиття k -ї та $(k-1)$ евакуаційних ділянок – відстань від початку k -ї евакуаційної ділянки до місця злиття її з $(k-1)$ евакуаційною ділянкою, м.

Кількість учасників, що переходить з однієї евакуаційної ділянки на іншу в одиницю часу, визначається пропускною здатністю виходу з ділянки $Q_k(t)$ за формулою:

$$Q_k(t) = q_k(t) \cdot c_k \cdot \frac{d(t)}{f \cdot 60} \text{ люд.}, \quad (2.11)$$

де $q_k(t)$ – інтенсивність руху на виході з j -ї евакуаційної ділянки в момент тривалості t , м/хв; c_k – ширина виходу з j -ї евакуаційної ділянки, м; $d(t)$ – проміжок тривалості, с; f – середня площа горизонтальної проекції людини, м^2 .

Інтенсивність руху на виході з k -ї евакуаційної ділянки $q_k(t)$ у момент часу t визначається залежно від щільності людського потоку на цій ділянці $Dv_k(t)$.

Щільність людського потоку на j -й евакуаційній ділянці $Dv_k(t)$ у момент часу t визначається за формулою:

$$Dv_k(t) = \frac{(N_k \cdot f \cdot dt)}{(a_k \cdot b_k)} \text{ м}^2/\text{м}^2. \quad (2.12)$$

де N_k – кількість людей на j -й евакуаційній ділянці, люд.; f – середня площа горизонтальної проекції людини, м^2 ; a_k – довжина j -ї евакуаційної ділянки, м; b_k – ширина j -ї евакуаційної ділянки, м; dt – проміжок часу, с.

У момент часу t визначається кількість учасників m із від’ємними координатами $x_i(t)$ визначеними за формулою (2.8). Якщо значення $m \leq Q_k(t)$, то всі m людей переходять на наступну евакуаційну ділянку та їхні координати визначаються за формулою (2.10). Якщо значення $m > Q_k(t)$, то кількість учасників, рівна значенню $Q_k(t)$, переходить на наступну евакуаційну ділянку та їхні координати визначаються за формулою (2.10), а кількість людей, рівна значенню $(m - Q_k(t))$, не переходить на наступну евакуаційну ділянку (залишаються на зазначеній евакуаційній ділянці) та їх координатам присвоюються значення: $x_i(t) = n \cdot 0,25 + 0,25$, де n – номер ряду, в якому будуть перебувати люди (максимально можлива кількість людей в одному ряді збоку один від одного для кожної евакуаційної ділянки визначається перед початком розрахунків). Таким чином, виникає скупчення людей перед виходом з евакуаційної ділянки.

На підставі заданих початкових умов (початкових координат людей, параметрів евакуаційних ділянок) визначаються щільності людських потоків на шляхах евакуації та пропускні здатності виходів з евакуаційних ділянок. Далі, у момент часу $t=t+dt$, визначається наявність НЧП на шляхах евакуації. Залежно від цього вибирається напрямок руху кожної людини й обчислюється нова координата кожної особи. Після цього знову визначаються щільності людських потоків на шляхах евакуації та пропускні спроможності виходів. Потім знову задається приріст за часом dt , і визначаються нові координати людей з урахуванням наявності НЧП на шляхах евакуації в цей момент часу. Після цього процес повторюється. Розрахунки проводяться доти, доки всі люди не будуть евакуйовані.

Імітаційно-стохастична модель. Стохастичними вважають моделі, де параметри, умови функціонування і характеристики стану об’єкта, який моделюється, представлені випадковими величинами і пов’язані випадковими

залежностями. Отже, характеристики стану в моделі визначаються неоднозначно, а за допомогою законів розподілу їх ймовірностей. У цій моделі, подібно до попередніх, розподіл кількості людей N_i на первинних ділянках із шириною b_i та довжиною a_i вважається рівномірним. Таким чином, на початковому етапі часу t_0 щільність потоку на ділянці Δl_i визначається згідно з формулою (2.12).

У подальшому перебігу руху настає злиття та перегрупування потоків. Це означає, що передня частина потоку, де немає інших учасників руху, розсіюється, і всі намагаються просуватися вільно. Вільний рух можливий при конкретному значенні щільності D_0 . Протягом інтервалу часу Δt частина людей переходить з цих елементарних ділянок на наступні, що призводить до зміни стану людського потоку.

Швидкість руху людського потоку при щільності D_i на i -му відрізку ділянки шляху j -го виду розглядається як випадкова величина V_{Dj} . Середнє значення цієї випадкової величини можна визначити за допомогою наступного співвідношення:

$$V_{Dj} = |V_{0j} \left[1 - a_j \ln \frac{D}{D_{0j}} \right]|, \text{ при } D > D_{0j}, \quad (2.13)$$

$$q_{Dj} = V_{Dj} D. \quad (2.14)$$

де V_{Dj} – швидкість руху у потоці по j -тій ділянці шляху при щільності потоку D ; q_{Dj} – інтенсивність руху у потоці по j -тій ділянці шляху при щільності потоку; D – щільність людського потоку на ділянці евакуаційного шляху, $\text{м}^2/\text{м}^2$; D_{0j} – порогове значення щільності людського потоку на j -тій ділянці шляху, при досягненні якого щільність потоку починає впливати на швидкість руху людей у потоці, $\text{м}^2/\text{м}^2$; V_{0j} – середнє значення швидкості вільного руху людей на j -тій ділянці шляху при значеннях щільності потоку $D \leq D_{0j}$, $\text{м}/\text{хв.}$; a_j – коефіцієнт, що відображає ступінь впливу щільності людського потоку на його швидкість під час руху на j -тій ділянці шляху.

При будь-якому можливому значенні V_{Dt} , люди в кількості $N_i t$ які знаходяться в момент t_i на i -й простій ділянці, рухаються по ній та починають переходити на наступну ділянку $(i + 1)$. Частина людей з попередньої $(i - 1)$ простої ділянки та з витоку j також переходить на цю ділянку.

Враховуючи злиття потоків, кількість людей N_i , що заходять на ділянку i за одиницю часу, буде рівною:

$$N_i = \sum_{i=1}^n \int_0^t V_D(t) b_i D_i(t) dt, \quad (2.15)$$

Визначимо кількість людей, що залишають ділянку i .

$$N_o = \sum_{i=1}^n \int_0^{t_0} V_D(t) b_i D_i(t) dt + \int_{t_0}^t V_D(t) b D(t) dt, \quad (2.16)$$

де t_0 – час виходу першої людини за межі ділянки.

Отже, кількість осіб, які перебувають на елементарній ділянці i у певний момент часу, може бути визначена:

$$N = N_i - N_o = \sum_{i=1}^k \int_0^t V_D(t) b_i D_i(t) dt - \left(\sum_{i=1}^k \int_0^{t_0} V_D(t) b_i D_i(t) dt + \int_{t_0}^t V_D(t) b D(t) dt \right) = \sum_{i=1}^k \int_{t_0}^t V_D(t) b_i D_i(t) dt - \int_{t_0}^t V_D(t) b D(t) dt, \quad (2.17)$$

Маючи загальну кількість осіб, які пройдуть через просту ділянку, можна визначити час, необхідний для проходження потоку через цю ділянку:

$$t = t_0 + \frac{N_{\text{заг}} - \sum_{i=0}^k \int_0^{t_0} V_D(t) b_i D_i(t) dt}{V_{\text{вих}} q_{\text{вих}} b}. \quad (2.18)$$

де $N_{\text{заг}}$ – загальна кількість людей, що евакуювалися через вихід; $V_{\text{вих}}$ – швидкість вільного руху на переході між ділянками; $q_{\text{вих}}$ – інтенсивність вільного руху при переході між ділянками; b – ширина переходу між ділянками.

Як можна побачити з опису, для втілення імітаційно-стохастичної моделі також необхідно використання відповідного програмного забезпечення.

2.1.3 Математична модель процесу руху потоків із маломобільними людьми різних груп

Дослідження математичних моделей руху людей під час евакуації є важливим напрямом в галузі безпеки та цивільного захисту. Мета таких

досліджень полягає в розробці ефективних стратегій та рекомендацій для підвищення безпеки та ефективності евакуаційних процесів у різних умовах.

Нині проведено багато досліджень математичних моделей руху людей під час евакуації за кордоном. Вони проведені в різних контекстах, таких як пожежі, природні катастрофи, терористичні загрози, чи інші ситуації екстреної евакуації. Також питання досліджень математичного моделювання руху людей під час евакуації не залишається без уваги і українськими науковцями [74].

Математичні моделі руху людей зазвичай конструюються за допомогою двох основних підходів: неперервного і дискретного (в часі і просторі) [75]. Неперервний підхід ґрунтується на тому, що рух людей можна описати диференціальними рівняннями. Цей метод ефективний для систем, що складаються з відносно однорідних частинок з обмеженими та передбачуваними взаємодіями [76].

У дискретних підходах простір розбивається на клітини, і зазвичай кожна частка (особа) займає одну з них. Пересування можливе лише між клітинами протягом кожного розрахункового часу (кроку), і напрямки руху обмежені [77].

Існують детерміновані та стохастичні моделі. У випадку детермінованих моделей, в усіх однакових умовах в кожній конкретній ситуації модель передбачає однакові «дії» для людей. Введення елементів випадковості в модель означає математичний опис різних, включаючи непередбачувані, дій людей. З іншого боку, введення елементів випадковості в модель допомагає згладжувати недостатність знань щодо процесу прийняття рішень під час руху, особливо у випадках екстрених ситуацій [78].

У роботі [79] була сформульована та розроблена математична модель індивідуально-потокowego руху людей, які можна апроксимувати набором еліпсів. Досліджено, що дана задача може бути зведена до проблеми щільного розміщення цих еліпсів із різною щільністю. Різна щільність виникає з урахування різних мінімально допустимих відстаней між еліпсами. Забезпечення дотримання цих відстаней викликане врахуванням ряду обмежень, таких як рух людей із різною швидкістю та врахування їхньої маневреності та комфортності.

Шлях руху розділяється на області Ω_m , які мають відповідні номери 1, 2, ..., m. Кожна область характеризується однаковим законом формування основного напрямку руху, і розглянуто області з прямолінійним рухом. У таких областях переміщення з точки, що аналізується, подається у вигляді вектора, який з'єднує дану точку з точкою на відповідному роздільнику областей (з урахуванням коефіцієнта гомотетії).

Припустимо, що на k-ій ітерації в області евакуації Ω_m знаходиться N_k людей із параметрами розміщення $u_{E_{ki}} = (x_{E_{ki}}, y_{E_{ki}}, \theta_{E_{ki}})$, $i = 1, 2, \dots, N_k$, де $(x_{E_{ki}}, y_{E_{ki}})$ – координати розміщення початку локальної системи координат, кутом повороту $\theta_{E_{ki}}$ та розмірами півосей еліпса E_i . Кожному еліпсу приписані також характеристики швидкості та маневреності, m_{ki} , $m_{ki} < 1$, м.

На k-ій ітерації постановка задачі визначена як пошук максимуму загального руху N_k осіб, які перебувають в області евакуації, з врахуванням обмежень на їхнє неперетинання та розташування в межах області з дотриманням визначених мінімальних відстаней. Ці обмеження обумовлені комфортністю, а також обмеженнями на відносний час Δt_i руху кожної окремої людини та кут її повороту, які виникають з маневреності руху [80].

Після ретельно досліджених властивостей моделі у [80], був розроблений метод моделювання переміщень людей з оптимізацією за групою змінних. Ці змінні включають параметри розташування особи та враховують послідовне одномоментне переміщення [81].

Суть методу послідовно-одномоментного переміщення осіб полягає в наступному: обирається особа, яка найближче знаходиться до виходу. Затримується основний напрямок її руху, з можливістю зміни в рамках маневреності. За вибраний інтервал часу обирається напрямок відносно основного, в якому особа здійснить найбільше переміщення. Відбувається переміщення особи в обраному напрямі із вибраною для неї локальною швидкістю. Положення особи фіксується. Потім обирається наступна особа, яка

найближча до виходу, і вищезазначені дії повторюються, і так далі. Переміщення протягом обраного інтервалу часу послідовно здійснюється для всіх осіб.

Отримаємо верхню межу складності алгоритму для моделювання послідовного переміщення людей E_i , $i = 1, 2, \dots, n$ у прямокутній області S_0 , що залежить від кількості людей.

Припустимо, що $i = 1$, і позначимо через β як трудомісткість конструювання умови неперетину еліпса і півплощини. Умова визначення області допустимого переміщення еліпса E_1 у прямокутній області S_0 потребує $N_i = N_i = 4\beta$ операцій [80, 81].

Якщо $i=2$, позначимо через β_1 як трудомісткість конструювання області для неперетину двох еліпсів E_1 та E_2 [80]. Нехай $\beta = \max\{\beta, \beta_1\}$. Тоді трудомісткість визначення області для переміщення E_2 складає $N_2 = N_i = 4\beta + \beta = 4\beta + (i-1) \cdot \beta$.

Розглянемо випадок, коли $i = 3$. Трудомісткість визначення області для переміщення складатиме E_3 , складатиме $N_3 = N_i = 4\beta + 2\beta = 4\beta + (i-1) \cdot \beta$ і т. ін.

В загальному випадку, коли $i = n$, будемо мати

$$N_n = N_i = 4\beta + (n - 1)\beta = 4\beta + (i - 1) \cdot \beta. \quad (2.19)$$

Складність алгоритму для моделювання переміщення еліпсів за послідовним методом буде представляти собою:

$$N = O(\sum_{i=1}^n N_i), \quad (2.20)$$

$$N = O\left(\sum_{i=1}^n (4\beta + (i - 1) \cdot \beta)\right) = O(4\beta \cdot n + \sum_{i=1}^n (i - 1) \cdot \beta) = O(4\beta \cdot n + \frac{\beta \cdot n}{2}) \quad (2.21)$$

Таким чином, верхня оцінка складності алгоритму є:

$$N = O\left(n \cdot \frac{9}{2}\beta\right), \quad (2.22)$$

інакше кажучи, існує пряма залежність між кількістю індивідів та часом, необхідним для моделювання їх евакуації.

Отримаємо верхню границю для часу переміщення.

Припустимо, що t_0 – це момент виходу першої особи з зони евакуації (горизонтальної ділянки). На час t_0 утворився потік людей в коридорі шириною w та довжиною l . Площа цього потоку дорівнює:

$$S_p = l \cdot w = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{D}, \quad (2.23)$$

де D , S_i – відповідно щільність потоку та площа проекції i -тої людини.

Довжина потоку дорівнює:

$$l = \frac{S_p}{w}, \quad (2.24)$$

а весь потік залишить коридор за час

$$t_{\text{пр.}} \leq \max_i \frac{l}{V_i}, \quad (2.25)$$

де V_i – швидкість i -ї людини.

Загальний час евакуації складає:

$$T \leq t_0 + t_{\text{пр.}} \leq t_0 + \frac{n \cdot S_{\text{сеп}}}{D \cdot w \cdot V_{\text{сеп}}}, \quad (2.26)$$

Вважаємо, що t_0 – величина, яка залежить від конфігурації будівлі і місця знаходження людей на початок евакуації і яку будемо рахувати сталою величиною C , тобто

$$T = C + t_{\text{пр.}} = C + \frac{n \cdot S_{\text{сеп}}}{D \cdot w \cdot V_{\text{сеп}}}, \quad (2.27)$$

Якщо потік однорідний, то $S_i = S_{\text{сеп.}}$; $V_i = V_{\text{сеп.}}$. В цьому випадку, час евакуації прямо пропорційний кількості людей, що залишають приміщення, тобто

$$T = O\left(t_0 + \frac{n \cdot S_i}{D \cdot w \cdot V_i}\right), \quad (2.28)$$

Якщо потік неоднорідний, то прийнявши $S = \max_i S_i$; $V_i = \min_i V_i$, отримаємо верхню оцінку часу виходу людей з будівлі (горизонтальної ділянки)

$$T = O\left(t_0 + \frac{n \cdot S}{D \cdot w \cdot V}\right), \quad (2.29)$$

Якщо врахувати зміну напрямків руху людини в рамках заданої маневреності, наприклад покласти дослідження з урахуванням m напрямків руху, то верхньою оцінкою складності алгоритму послідовно-одинокого переміщення буде величина

$$T = O\left(m \cdot \left(t_0 + \frac{n \cdot S}{D \cdot w \cdot V}\right)\right). \quad (2.30)$$

Даний алгоритм надає можливість моделювати рух людей з обмеженими мобільними можливостями в потоці змішаного складу у різноманітних

громадських будівлях, що можуть належати до різних класів функціональної пожежної безпеки. Метод дозволяє ефективно моделювати потоки людей при їх евакуації з кінотеатрів, ТРЦ, місць з масовим перебуванням людей та інших подібних об'єктів. Проте алгоритм вимагає значних обчислювальних ресурсів, особливо при врахуванні великої кількості індивідуальних чинників та складних взаємодій.

2.2 Встановлення критеріїв, що впливають на параметри руху змішаних потоків людей при евакуації з торговельно-розважального центру

До цього часу використовувалися єдині параметри руху людей в будівлях, які були загальні для всіх, за винятком спеціалізованих приміщень. Це призводило до недооцінки рівня пожежної безпеки для найбільш вразливих груп населення, таких як діти та люди похилого віку. Проведені вперше натурні спостереження вивчили структуру та встановили параметри руху людських потоків в будівлях різних класів функціональної пожежної безпеки.

На основі отриманих даних натурних спостережень щодо руху людей в різних будівлях та їх математичної обробки виявлені характерні групи основного функціонального контингенту, які включають «Дошкільнята», «Школярі», «Молодь», «Службовці», «Літні люди» та «Маломобільні групи населення», а також гетерогенні склади, такі як «Діти і батьки», «Активна сім'я», «Службовці і пенсіонери», «Всі вікові групи». З метою врахування перспектив зміни демографічної ситуації в країні розроблена модель, яка дозволяє розраховувати параметри руху потоків людей будь-якого складу.

Проведені дослідження руху людей із порушенням зору та слуху, а також додаткові дослідження осіб із ураженням опорно-рухового апарату дозволили визначити параметри, що описують закономірності їх руху в різних сценаріях - по горизонтальних маршрутах, по сходах вниз і вгору, а також через отвір. Аналіз існуючої класифікації груп населення із обмеженими можливостями виявив її недоліки, і на основі критерію, який характеризує швидкість руху осіб, було

розроблено більш досконалу класифікацію, враховуючи види дисфункцій організму та доповнено її новими даними.

Інформація про кількість людей із обмеженими можливостями в будівлі є основним критерієм для забезпечення їхньої безпеки. Нормативні документи з будівництва містять окремі показники кількості, проте вони не завжди взаємодіють між собою, містять протиріччя та не мають обґрунтування. В свою чергу технічна література надає повні дані про категорії осіб із обмеженими можливостями, що не повністю враховує диференціацію за групами мобільності.

Дослідження особливостей індивідуального руху різних груп мобільності в загальному потоці та наступний аналіз отриманих результатів призвели до виявлення закономірностей їх руху. На основі цих даних був розроблений математичний алгоритм індивідуального руху людей в загальному потоці, який враховує склад основного функціонального контингенту будівель та чисельність людей різних груп мобільності.

Отримані дані дозволяють розвивати чисельні методи моделювання індивідуально-потокowego руху з урахуванням особливостей пішоходів в різних умовах і підходити до точнішого відтворення руху людського потоку.

Таким чином, це дослідження сприяє розвитку теорії руху людських потоків, зокрема шляхом диференціації будівель за класами функціональної пожежної небезпеки та урахуванням формування потоків в них. Отримані нові результати характеризують параметри руху маломобільних груп населення. Удосконалення алгоритмів моделювання процесу евакуації, заснованих на цих даних, сприяє підвищенню рівня безпеки людей під час пожеж.

Незважаючи на проведені дослідження в даній галузі, існують проблеми, які потребують вирішення для подальшого розвитку теорії руху людських потоків. Нормативи, фактично, визначають однорідність складу основного функціонального контингенту в будівлях різного призначення. Однак виявляється, що склад потоку значно відрізняється за віком; наприклад, у цирку переважають діти і підлітки (понад 30 %), а в театрі - літні люди (понад 50 %). Це суттєво впливає на параметри людського потоку [82], і, відповідно, на час

евакуації та рівень пожежного ризику. Таким чином, проблема визначення параметрів руху людей залишається актуальною.

Розподіл людей з обмеженими можливостями на групи мобільності для будівель різних класів функціональної пожежної небезпеки потребує перегляду. Нинішні категорії M1 і M2 потребують виправлень, враховуючи особливості кожної групи. Наприклад, групу M1 слід розширити, включаючи глухих і слабочуючих людей через їх обмежену мобільність, а групу M2 – врахувати різні критерії (втрата зору, вікові обмеження, психічні відхилення, протези) та диференціацію. Для груп M3 і M4 важливо враховувати вік, оскільки цей фактор суттєво впливає на швидкість та інші параметри руху.

Не зважаючи на значний обсяг досліджень руху людських потоків, недостатньо проведено дослідження руху маломобільних людей в них. Це ускладнює розрахункову оцінку та нормування розмірів евакуаційних шляхів та виходів для цієї категорії населення. Потреба в удосконаленні розрахункових методів для оцінки безпеки людей під час пожежі є актуальною, а це вимагає розвитку алгоритмів моделювання евакуаційних процесів з використанням великої кількості фактичних даних і їх статистичної обробки.

Узагальнений вектор цього дослідження включає розвиток методології нормування параметрів руху людських потоків, зокрема з урахуванням віку і фізичних можливостей, і розробку алгоритмів індивідуально-потокowego руху для різних груп населення в будівлях з урахуванням класу функціональної пожежної небезпеки.

Основні критерії параметрів руху можна класифікувати у три основні групи: швидкість руху, щільність потоку та рівень інформованості людей, залежно від характеристик об'єкта. Критерій «Швидкість руху» розглядається за трьома підкритеріями, а саме: емоційно-психологічний стан і фізіологічний стан. Критерій «Щільність потоку» розділяється на вільне рухання без перешкод, безконтактне пресування в потоці, рух з контактними перешкодами та вплив силових факторів. Критерій «Інформованість людей в залежності від характеристик об'єкта» включає підкритерії B1, B2 і B3.

За оцінками ВООЗ [83], понад 1 мільярд людей мають якусь форму інвалідності, а це майже 15 % населення світу. Статистичні дані свідчать, що зайнятість серед чоловіків-інвалідів (35 %) і жінок-інвалідів (20 %) нижча, ніж серед людей без інвалідності (у чоловіків – 65 %, у жінок – 30 %). В Україні понад 2 мільйони 800 тисяч людей мають статус інваліда, з них 151 тисяча – діти. Це 6,1 % від загальної кількості населення. І майже 80 відсотків інвалідів – це люди працездатного віку.

Незважаючи на обмеження, особи із інвалідністю мають право на незалежний спосіб життя та повну участь у громадському житті, так само як і інші громадяни. Збільшення їхньої кількості в громадських будівлях вимагає врахування їхніх особливих потреб для забезпечення безпеки під час нормального функціонування та у випадку надзвичайних ситуацій, таких як пожежі чи інші інциденти, що вимагають екстреної евакуації.

Основні ризики перебування осіб із інвалідністю в ТРЦ включають можливість падінь, втрату орієнтації, обмежену доступність окремих приміщень та труднощі у отриманні необхідної інформації. Недостатнє вирішення цих питань на етапі планування будівлі може призвести до зниження рівня комфортності та безпеки для цільової аудиторії. У разі надзвичайної ситуації, організаційно-планувальні рішення повинні гарантувати ефективну евакуацію всіх відвідувачів, зокрема осіб із інвалідністю та інших уразливих груп населення, з урахуванням їхніх особливостей. Традиційний підхід до організації евакуації, який не враховує обмеження життєдіяльності, може виявитися недостатньо ефективним та призвести до трагічних наслідків.

В наступному питанні розглянемо групи мобільності, що наведено в [5] (таблиця 2.2).

Таблиця 2.2

Групи мобільності осіб відповідно до [5]

Групи мобільності	Загальні характеристики людей груп мобільності
М1	Особи з інвалідністю, що не мають обмежень щодо мобільності, у тому числі з порушенням слуху
М2	Немічні люди, мобільність яких знижена через старіння організму (особи з інвалідністю по старості); особи з інвалідністю на протезах; особи з інвалідністю з порушенням зору, що користуються білою тростиною; люди з психічними відхиленнями
М3	Особи з інвалідністю, що використовують під час руху додаткові опори (милиці, ціпки)
М4	Особи з інвалідністю, що пересуваються на кріслах колісних, які приводяться в рух вручну

Під час аналізу науково-технічної документації виникає ряд запитань стосовно відсутності у стандарті визначень для груп немобільних осіб, які не здатні до самостійного пересування (наприклад, люди з травмами опорно-рухового апарату або сліпі особи), а також відсутності методичних підходів для розрахунку їхньої евакуації. Додатково, у методиці не враховано евакуацію для осіб, транспортування яких є неприпустимим у зв'язку з безпосередньою загрозою життю (наприклад, у реанімаційних закладах), а також для осіб із обмеженим ступенем свободи, включаючи людей із психічними відхиленнями, як у психіатричних лікарнях. З цього приводу пропонується використовувати наступний класифікатор для груп населення, який подається в таблиці 2.3.

Існуючий на сьогодні класифікатор груп мобільності для осіб з обмеженими можливостями потребує значної корекції. Група М1, за винятком глухих і слабочуючих людей, які характеризуються зменшеною мобільністю, потребує уточнень. Група мобільності М2 має перевантаження через несумісність критеріальних ознак, таких як втрата зору, вікова немічність, психічні відхилення та наявність протезів, і вимагає диференціації.

Таблиця 2.3

Класифікація маломобільних груп населення

Групи мобільності	Загальні характеристики людей груп мобільності
M1	Особи з інвалідністю, що не мають обмежень щодо мобільності, у тому числі з порушенням слуху
M2	немічні люди, мобільність яких знижена через старіння організму; інваліди на протезах; інваліди з вадами зору, що користуються білою тростиною; люди з психічними відхиленнями
M3	Особи з інвалідністю, що використовують при русі додаткові опори (милиці, ціпки)
M4	Особи з інвалідністю, що пересуваються на кріслах-колісних, які приводяться у рух вручну
НМ	Особи, які не мають можливості пересуватися самостійно (наприклад, люди з травмами опорно-рухового апарату)
НТ	Особи, дії з транспортування яких є неприпустимими, внаслідок прямої загрози життю, викликаній таким транспортуванням
НО	Особи з обмеженим ступенем свободи, в тому числі люди з психічними відхиленнями

Для осіб з груп мобільності M3 і M4 необхідно враховувати вік, оскільки цей критерій має значний вплив на швидкість та інші параметри руху.

Важливо відзначити, що, незважаючи на значний обсяг досліджень щодо руху людських потоків через дверні проходи, дослідження, спрямовані на маломобільних осіб, залишаються невивченими. Це фактично ускладнює розрахункову оцінку та нормування розмірів евакуаційних шляхів і виходів для цільових груп населення з обмеженими можливостями.

Необхідність вдосконалення розрахункових методів, спрямованих на оцінку безпеки людей під час пожежі, вимагає активного розвитку алгоритмів моделювання процесу евакуації. Це, в свою чергу, передбачає збір великого обсягу фактичного матеріалу та його статистичну обробку.

Аналіз психоемоційного стану людей у випробуваннях та спостереженнях неможливий без моделювання вимушеної евакуації людей при пожежі, що близька до реальної ситуації, без врахування їх психологічного стану. Таким чином, встановлена як стандартна (нормативна) методика розрахунку часу евакуації має умовний характер, оскільки не враховує другу ключову складову

процесу евакуації людей - систему «людина», а саме їхній психоемоційний стан в умовах пожежі.

Ступінь свободи в русі кожної людини взаємозв'язан з щільністю потоку. Бажання змінити швидкість руху виникає під впливом навколишніх умов і мотивів, що викликають рух потоку. Ці фактори формують психоемоційний стан людей, який визначає основні параметри руху людського потоку, такі як щільність і швидкість. Навіть за однакової щільності потоку різна швидкість руху може пояснюватися тим, що в межах можливостей кожна людина може власноруч регулювати свою швидкість в залежності від своїх мотивацій.

В дослідженнях, спрямованих на врахування психоемоційного стану людей під час пожежі у розрахунках евакуації, не було досягнуто логічного завершення.

Існуючі підходи до розуміння евакуації людей як примусового процесу мають традиційний характер, оскільки вони враховують лише один аспект системи «людина – техніка»: інженерно-технічні рішення забезпечення евакуації людей.

У ситуації примусової евакуації, разом із щільністю потоку, емоційний стан має вирішальне значення для людини у виборі оптимальної швидкості виходу з небезпечної зони. Особа отримує певну кількість актуальної інформації I_m щодо пожежі в будівлі, і способи передачі цієї інформації можуть відрізнятися (через системи оповіщення, за окремими ознаками пожежі або через власне візуальне спостереження тощо). Мотивація для прийняття рішення та швидкість подальших дій залежать від рівня достовірності і повноти інформації, необхідної для порятунку. Ця інформація I_m має включати такі мінімальні відомості: правдивість факту пожежі, конкретне або передбачуване місце виникнення пожежі, безпечні маршрути евакуації, кількість та розташування виходів для евакуації. Додаткові відомості можуть бути необхідні в залежності від функціонального призначення будівлі (наприклад, готель, театр, ТРЦ тощо).

Швидкість та прийняття рішень людиною під час надзвичайної ситуації значно впливають на ступінь інформованості та повноту отриманої інформації, яка є необхідною для безпечної евакуації. Ця інформація повинна містити основні

дані, такі як правдивість факту пожежі, точне або передбачуване місце її початку, безпечні маршрути евакуації, а також кількість та розташування виходів для виходу. Додаткова інформація може бути потрібна в залежності від призначення будівлі, такої як готель, театр або танцювальний зал.

Таким чином, при вимушеній евакуації людей психо-емоційний фактор стану людини E можна представити виразом:

$$E = f(P; I_m - I_n), \quad (2.31)$$

де P – потреби людини; I_m – інформація, що є у людини; I_n – інформація, необхідна для порятунку людини.

У цьому контексті, людські потреби включають бажання зберегти власне життя, уникнути можливих травм, захистити особисте власність і також допомогти іншим особам у випадку необхідності. Якщо отримана інформація відповідає тій, яка необхідна для порятунку ($I_m = I_n$), то психоемоційний фактор не спонукає людину до неадекватних дій ($E = 0$).

У випадку, коли наявна інформація є недостатньою для порятунку людини ($I_m < I_n$), це може призвести до виникнення сильного емоційного напруження, яке, зі збільшенням негативного впливу психоемоційного фактору, може призвести до стресу ($E < 0$). Інформаційний стрес може бути визначений як стан підвищеної психічної напруги, супроводжуваний функціональною та психічною дезінтеграцією, негативними емоційними переживаннями та порушеннями адекватних дій внаслідок негативного впливу емоційних факторів.

У стані стресу людина може здійснювати дії, що перешкоджають руху людського потоку, що в кінцевому підсумку призводить до істотного збільшення часу евакуації.

Не можна розглядати рух людських потоків з позиції як однаково стабільних індивідів, оскільки кожна людина унікальна. За результатами досліджень описаних в розділі 1.4, існуючі методи розрахунку часу евакуації людей під час пожежі потребують подальшого розвитку та удосконалення

шляхом дослідження різних аспектів виявлення людського фактору та його активності, що дозволить оптимізувати систему «людина – техніка» не лише з точки зору техніки, але й людського чинника.

2.3 Визначення закономірності зміни параметрів швидкості руху людських потоків від наявності людей різних груп мобільності в торговельно-розважальних центрах

Визначення закономірностей зміни параметрів швидкості руху людських потоків в ТРЦ при наявності маломобільних осіб різних груп є важливим завданням для забезпечення безпеки та комфорту всіх відвідувачів цих закладів. Дослідження в цій області спрямовані на вивчення впливу різних факторів на рух людських потоків, а також встановлення закономірностей, які виникають при взаємодії між маломобільними і здоровими людьми в таких середовищах.

Ці закономірності визначаються різними чинниками:

Типом маломобільної групи: швидкість руху може змінюватися залежно від типу маломобільних осіб, таких як люди з інвалідністю, літні люди або батьки з дітьми. Кожна група може мати свої особливості поведінки та потреби під час руху.

Кількістю маломобільних осіб: чим більше маломобільних осіб у потоці, тим більше вони можуть уповільнювати рух всього потоку, особливо на вузьких чи переповнених місцях.

Структурою простору: вплив маломобільних осіб на швидкість руху також залежить від структури самого простору. Наявність широких коридорів та облаштування спеціальних зон для маломобільних осіб може зменшити вплив їхнього руху на загальну швидкість потоку.

Реакцією інших відвідувачів: інші відвідувачі ТРЦ також можуть впливати на швидкість руху, реагуючи на наявність маломобільних осіб. Це може призводити до уповільнення або збільшення швидкості руху відповідно до ситуації.

Один із методів для збору та аналізу даних про поведінку, руху змішаних людських потоків та евакуації маломобільних осіб полягає у використанні фото- та відеозапису для отримання інформації.

Один із останніх прикладів успішного використання відеоспостереження полягає у його застосуванні під час проведення експериментів з дослідження евакуації людей різних груп мобільності з ТРЦ [36–40], а також евакуації дітей шкільного віку з різними рівнями мобільності в закладах загальної середньої освіти з інклюзивним навчанням [44–47].

Швидкість переміщень людини $V_{\text{ПЕР}}$ (м/хв) за n кадрів спостереження за нею визначається за формулою:

$$V_{\text{ПЕР}} = \sum_1^n \Delta l \cdot 60 / \sum_1^n \Delta t, \quad (2.32)$$

При русі через проріз підраховується кількість людей $N_{\Delta t}$, що проходять через нього за певний інтервал часу Δt . Величина Δt визначалася тривалістю існування перед границею прорізу конкретного значення щільності D_i .

Далі визначається інтенсивність руху q_D (люд/(м хв) через проріз шириною δ (м) при спостерігається протягом інтервалу часу Δt щільності потоку D_i перед ним

$$q_D = N_{\Delta t} / (\delta \cdot \Delta t), \quad (2.31)$$

а потім швидкість V_D (м/хв) переходу через границю прорізу при щільності D_i :

$$V_D = q_D / D_i \quad (2.32)$$

Шляхом аналізу відеозаписів, МГН які мають можливість самостійного пересування, встановлюються групи мобільності.

Для теоретичного розгляду натурних спостережень застосовується математична формула, яка відображає взаємозв'язок між щільністю потоку, що є зовнішнім впливом, і швидкістю, яка є реакцією сенсорної системи людини на цей вплив.

$$V_{Dj}^E = V_{0j}^E \left(1 - a_j \ln \frac{D_i}{D_{0j}} \right) \quad (2.33)$$

де V_{0j} – швидкість вільного руху (при відсутності впливу оточуючих людей: $D_{ij} < D_{0j}$), що залежить від виду шляху j і рівня емоційного стану (індекс «E»)

людей; D_{0j} – порогове значення щільності потоку, після досягнення якого щільність починає впливати на швидкість руху людей в потоці; a_j – коефіцієнт, що відображає вплив виду шляху на швидкість руху людей.

Значення, що входять у вираз (2.33), відповідають параметрам a_j і D_{0j} , які визначаються шляхом апроксимації емпіричних даних за допомогою методу найменших квадратів, а також параметру V_{0j} .

При розгляді загального змішаного потоку, що включає всіх людей різних груп мобільності, також визначається значення a_j , D_{0j} і V_{0j} .

Значення теоретичного кореляційного коефіцієнта η_t , який обчислюється для визначення ступеня взаємозв'язку між швидкістю і щільністю потоку, свідчить про його практично функціональний характер ($\eta_t = 1$).

Високі значення η_t свідчитимуть про правильність використаного опису шуканої залежності (2.33), що підтверджуватиме достовірність отриманих параметрів a_j , D_{0j} і V_{0j} . Це вказує на можливість встановлення зв'язку між швидкістю руху МГН на різних ділянках маршруту евакуації.

Наступний етап – визначення особливостей евакуації людей, які не можуть самостійно пересуватися. Для цього вимірюється швидкість перенесення на ношах по різних видах маршруту (горизонтальний, сходи - спуск і підйом), а також на різних етапах перекидання на носилки.

У формулі для обчислення часу евакуації людей, які не можуть самостійно рухатися, з різних поверхів будівлі за допомогою нош існують певні припущення, тому вона не враховує вплив фізичної втоми людей (персоналу), які переносять ноші, або формування людських заторів на маршрутах евакуації під час пожежі.

Розрахунковий час евакуації t_p складається з декількох етапів: перекидання кожної людини, яка не може самостійно рухатися, на ноші; часу транспортування до безпечного місця; часу перекидання з нош та повернення за наступною людиною. Після того, як остання людина, яка не може самостійно рухатися, евакуюється, повернення людей, які здійснювали евакуацію, у будівлю не передбачається.

$$t_p = \left(0,34 + \frac{L_1}{V_1^n} + \frac{L_2}{V_2^n} + \frac{L_1}{V_1} + \frac{L_2}{V_2}\right) \cdot \frac{N_{HM}}{0,5 \cdot N_{перс}} - \left(\frac{L_1}{V_1} + \frac{L_2}{V_2}\right) \quad (2.34)$$

де N_{HM} – кількість людей, нездатних самотійно пересуватися, що знаходяться на поверсі; $N_{перс}$ – кількість персоналу, що знаходиться на поверсі; L_1 – довжина шляху евакуації по горизонталі, м; L_2 – довжина шляху евакуації сходами, м; $V_1 = 100$ м/хв – швидкість пересування персоналу по горизонталі з ношами без людини; $V_1^n = 70$ м/хв – швидкість пересування персоналу по горизонталі з ношами із людиною; $V_2 = 60$ м/хв – швидкість пересування персоналу по сходах вгору з ношами без людини; $V_2^n = 30$ м/хв – швидкість пересування персоналу по сходах вниз з ношами із людиною; коефіцієнт 0,34, позначає середній час перекидання людини нездатної самотійно пересуватися, на ноші і з нош в безпечному місці.

Дані, зібрані під час таких розрахунків, мають бути доповненням до наявної бази матеріалів з вивчення особливостей евакуації людей з фізичними обмеженнями. Виявлені значення a_j , D_{0j} і V_{0j} для різних маршрутів пересування МГН дозволяють визначити психофізичні закономірності зв'язку між швидкістю руху та щільністю людських потоків в різних закладах, в тому числі і ТРЦ. Результати щодо перекидання та перенесення людей, які не можуть самотійно рухатися, повинні враховуватися при розробці планувальних рішень будівель з метою забезпечення своєчасної та безперешкодної евакуації.

2.4 Висновки за розділом

1. Обґрунтування моделей і методів для визначення часу евакуації з ТРЦ є критично важливим у забезпеченні безпеки та захисту в разі надзвичайних ситуацій, таких як пожежі або інші аварійні ситуації. Доцільність використання певних моделей та методів базується на декількох ключових факторах:

- моделі та методи повинні враховувати унікальні особливості ТРЦ, такі як їх розміри, конфігурація, розташування в приміщеннях, наявність ескалаторів, ліфтів та інших елементів, що впливають на процес евакуації.

- врахування факторів, що стосуються приміщень ТРЦ, таких як склад та розміри потоків людей, розподіл за віком та фізичними можливостями, є важливим для точності моделювання евакуації.

- моделі та методи повинні відповідати вимогам стандартів безпеки та евакуації, які можуть міститися в будівельних нормах, пожежних нормативах, а також міжнародних стандартах.

- ефективні моделі повинні враховувати широкий спектр факторів, таких як поведінка людей під час евакуації, географічні та кліматичні умови, наявність внутрішніх перешкод та інші чинники, які можуть впливати на час евакуації.

- моделі повинні допомагати в знаходженні оптимальних рішень для планування евакуаційних заходів, включаючи розташування виходів, розміщення евакуаційних шляхів та визначення необхідної кількості персоналу для керування евакуацією.

Обґрунтування вибору конкретних моделей і методів повинно базуватися на їх ефективності, точності та здатності адаптуватися до конкретних умов ТРЦ.

2. Розглянуто та проаналізовано класифікації моделей евакуації. Ці категорії можуть перетинатися, і конкретна модель евакуації може відповідати кільком категоріям одночасно. Вибір конкретної моделі залежить від цілей дослідження, доступних ресурсів та характеристик конкретної ситуації евакуації.

3. Спрощена аналітична модель для розрахунку евакуації має кілька переваг:

- легкість реалізації та використання: Ця модель дозволяє проводити розрахунки без великого обсягу обчислень та складних алгоритмів, що полегшує її впровадження та використання.

- завдяки своїй простоті, спрощена аналітична модель зазвичай забезпечує швидкість розрахунків, що може бути важливим у випадках, коли потрібно виконати багато ітерацій або аналізувати великий об'єм даних.

- ефективність для загальних сценаріїв: Якщо конкретні обставини евакуації не вимагають деталізованої інформації або слід враховувати загальні тенденції, спрощена модель може бути ефективною та прийнятною.

- у випадках, коли обмежені обчислювальні ресурси або обмежена доступність даних, спрощена аналітична модель може стати практичним рішенням.

- використання для основного аналізу: Для основного аналізу ситуацій евакуації, коли потрібно оцінити загальний час та ефективність процесу, спрощена модель може бути достатньою.

- важливо враховувати, що спрощена модель може недостатньо точно відображати складні та динамічні сценарії евакуації, і вона може бути менш ефективною у випадках, де потрібно детально моделювати індивідуальні характеристики та взаємодії учасників евакуації.

Недоліки спрощеної аналітичної моделі для розрахунку евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності включають:

- спрощена модель не дозволяє враховувати індивідуальні характеристики учасників евакуації, такі як різні швидкості ходьби, фізична мобільність та інші фактори, що можуть впливати на їх поведінку.

- спрощена модель може бути менш ефективною у складних та різноманітних сценаріях евакуації, де важливо враховувати різні сценарії та стратегії дій різних груп мобільності.

- спрощена модель може недостатньо точно враховувати просторові характеристики евакуаційного шляху та його вплив на рух людських потоків.

- модель може не враховувати фізичні взаємодії між учасниками евакуації, такі як взаємодія при перетині шляхів, перешкоди та інші фактори.

- спрощена модель може бути менш гнучкою для адаптації до різних умов та змінних факторів, що може обмежити її застосування в різних ситуаціях.

У випадках, коли потрібно детально вивчити індивідуальні характеристики та взаємодії різних груп людей у складних умовах евакуації, інші більш складні моделі, такі як індивідуально-потокові моделі, можуть бути більш ефективними.

Вибір індивідуально-потокової моделі для розрахунку евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності обґрунтовується кількома ключовими факторами, які враховують різноманітність та динаміку руху учасників евакуації:

- ця модель дозволяє враховувати індивідуальні характеристики кожного учасника евакуації, такі як швидкість руху, фізичні можливості, роль в евакуаційному процесі тощо. Це важливо, оскільки різні люди можуть мати різні можливості та потреби під час евакуації;

- модель розглядає рух кожного учасника як динамічний процес, що дозволяє враховувати зміни в умовах евакуації, такі як перешкоди, зміни швидкості руху тощо;

- індивідуально-потокова модель наближена до реальних умов евакуації, оскільки враховує індивідуальні рішення та взаємодії між учасниками;

- завдяки урахуванню індивідуальних особливостей та динаміки руху, ця модель може забезпечити більш точні та реалістичні результати тривалості евакуації;

- модель може бути адаптована до різних умов та типів приміщень, що робить її гнучкою для застосування в різноманітних сценаріях;

- модель дозволяє враховувати різні характеристики руху для кожної особи, такі як швидкість, фізична здатність, тип інвалідності тощо. Це важливо для точного моделювання руху осіб різних груп мобільності;

- модель дозволяє враховувати взаємодію та вплив руху різних груп мобільності одна на одну. Це важливо при евакуації змішаних потоків, де різні групи можуть взаємодіяти та впливати на швидкість та ефективність руху;

- модель враховує різноманітність учасників евакуації, дозволяючи враховувати різні характеристики руху для різних груп мобільності. Це важливо для точного відображення реальних умов евакуації;

– врахування індивідуальних характеристик сприяє створенню більш безпечних та ефективних умов евакуації для різних груп мобільності.

Обрана індивідуально-потокова модель дозволяє точніше відтворити складні умови евакуації змішаних потоків, забезпечуючи найбільш адекватне моделювання руху різних груп мобільності та сприяючи покращенню ефективності та безпеки евакуаційних заходів, однак ці розрахунки можливо здійснювати лише із використанням сучасних комп'ютерних програм.

4. Алгоритм, який описаний у 2.1.3, дозволяє симулювати рух людей з фізичними обмеженнями у потоках різноманітного складу в різних громадських будівлях, які можуть належати до різних класів функціональної пожежної небезпеки. Цей метод ефективно моделює потоки людей під час їх евакуації з кінотеатрів, торгово-розважальних комплексів, місць масового перебування та подібних об'єктів. Однак для використання цього алгоритму потрібні значні обчислювальні ресурси, особливо при урахуванні великої кількості індивідуальних факторів та складних взаємодій.

5. Для забезпечення безпечної евакуації людей з будівель ТРЦ та інших об'єктів з масовим перебуванням людей потрібно враховувати такі критерії для розрахунку:

- розрахункові значення параметрів руху людських потоків;
- врахування значення площі горизонтальної проекції людини в залежності від групи мобільності;
- розрахункові значення параметрів руху людських потоків по пандусах для осіб похилого віку;
- розрахункові залежності між щільністю і інтенсивністю руху людського потоку, складеного з людей, які рухаються на інвалідних візках;
- розрахункові залежності при транспортуванні немобільних осіб силами наявного персоналу за допомогою носилок;
- врахування рівнів психоемоційного стану людей під час евакуації у разі пожежі, що впливають на початок евакуації та їх рух.

6. Вивчення параметрів швидкості руху людських потоків в ТРЦ показало, що наявність осіб з різними групами мобільності значно впливає на ці параметри. Виявлено, що швидкість руху може варіюватись в залежності від складу групи людей та щільності людського потоку, що важливо для планування евакуаційних заходів та безпеки у таких об'єктах.

7. Представлена методика експериментальних досліджень евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності дасть змогу створити емпіричні табличні дані щодо параметрів руху змішаних евакуаційних потоків, а саме встановити залежності між швидкістю руху учасників евакуації та щільності потоку. Отримані дані дозволять встановити залежності швидкості руху від щільності для кожної конфігурації потоку, виведення коефіцієнтів адаптації людського потоку до зміни його щільності під час руху з різним відсотковим співвідношенням учасників груп мобільності М1, М3, М4 та провести оцінку взаємозв'язків між щільністю людського потоку, часткою учасників, груп мобільності М1, М3, М4, і швидкістю руху людського потоку за допомогою кореляційно-регресійного аналізу.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕВАКУАЦІЇ ЗМІШАНИХ ПОТОКІВ ЛЮДЕЙ РІЗНИХ ГРУП МОБІЛЬНОСТІ В ТОРГОВЕЛЬНО-РОЗВАЖАЛЬНОМУ ЦЕНТРІ

У даному розділі висвітлено результати експериментальних досліджень, спрямованих на вивчення евакуації змішаних потоків людей різної мобільності в ТРЦ. Ці дослідження відіграють важливу роль у формуванні наукових підстав для розробки оптимальних стратегій евакуації, що мають на меті забезпечення безпеки та захисту всіх присутніх у цих об'єктах.

3.1 Методика експериментальних досліджень евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності М1, М3 та М4

Експериментальні дослідження евакуації людей різних груп мобільності (М1, М3 та М4) виконуються з метою формування баз емпіричних даних параметрів руху змішаних евакуаційних потоків відповідно до [84]. Наявність цих даних дає змогу встановити залежності між швидкістю руху учасників евакуації та щільністю потоку. Означені залежності використовують під час розрахунку тривалості евакуації з будівель та споруд різного призначення, побудови теплових карт щільності людського потоку на різних ділянках евакуаційних шляхів; визначення часу існування скупчень біля дверних прорізів та локальних перешкод; встановлення середньої швидкості учасників евакуації.

Експериментальні дослідження проведені в Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності із залученням здобувачів вищої освіти. Імітацію поведінки учасників евакуації груп мобільності М3 та М4 забезпечено шляхом пересування окремих учасників експерименту на опорах (милицях) та кріслах колісних.

Сегмент будівлі для відтворення експерименту обрано на основі проведеного аналізу планування будівель ТРЦ «Smart Plaza Obolon» та Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.

Довжина експериментальної ділянки становить 49,91 м, ширина становить 3,07 м.

Для збору даних в процесі експерименту використано динамічну відеореєстрацію. Відеозапис безпосередньо виконувався як учасниками так і організаторами експерименту.

В ході експериментальних досліджень передбачено варіанти конфігурацій евакуаційних потоків з різним відсотковим співвідношенням учасників груп мобільності М1, М3 та М4, а саме:

1. Рух потоку людей групи мобільності М1 (100 %) без наявності маломобільних груп населення (рис. 3.1) на ділянці шляху різної ширини із створенням затримки людського потоку під час проходження крізь дверний проріз.

2. Рух змішаного потоку людей груп мобільності М1 (96,67 %) та М3 (3,33 %) (рис. 3.2) на ділянці шляху змінної ширини із створенням затримки людського потоку під час проходження крізь дверний проріз.

3. Рух змішаного потоку людей груп мобільності М1 (93,33 %) та М3 (6,67 %) (рис. 3.3) на ділянці шляху змінної ширини із створенням затримки людського потоку під час проходження крізь дверний проріз.

4. Рух змішаного потоку людей груп мобільності М1 (90 %) та М3 (10 %) (рис. 3.4) на ділянці шляху змінної ширини із створенням затримки людського потоку під час проходження крізь дверний проріз.

5. Рух змішаного потоку людей груп мобільності М1 (96,67 %) та М4 (3,33 %) (рис. 3.5) на ділянці шляху змінної ширини із створенням затримки людського потоку під час проходження крізь дверний проріз.

6. Рух змішаного потоку людей груп мобільності М1 (93,33 %) та М4 (6,67 %) (рис. 3.6) на ділянці шляху змінної ширини із створенням затримки людського потоку під час проходження крізь дверний проріз.

7. Рух змішаного потоку людей груп мобільності М1 (90 %) та М4 (10 %) (рис. 3.7) на ділянці шляху змінної ширини із створенням затримки людського потоку під час проходження крізь дверний проріз.

8. Рух змішаного потоку людей груп мобільності М1 (90 %), М3 (3,33 %) та М4 (6,67 %) (рис. 3.8) на ділянці шляху змінної ширини із

створенням затримки людського потоку під час проходження крізь дверний проріз.

9. Рух змішаного потоку людей груп мобільності M1 (90 %), M3 (6,67 %) та M4 (3,33 %) (рис. 3.9) з подальшим створенням затримки людського потоку в дверному прорізі.

10. Рух змішаного потоку людей груп мобільності M1 (93,33 %), M3 (3,335 %) та M4 (3,335 %) (рис. 3.10) на ділянці шляху змінної ширини із створенням затримки людського потоку під час проходження крізь дверний проріз.

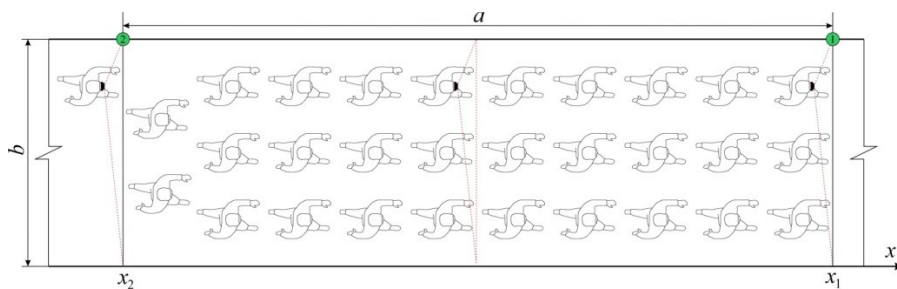


Рисунок 3.1 – Схема руху потоку людей групи мобільності M1 (100 %) з проведенням динамічної зйомки [84]

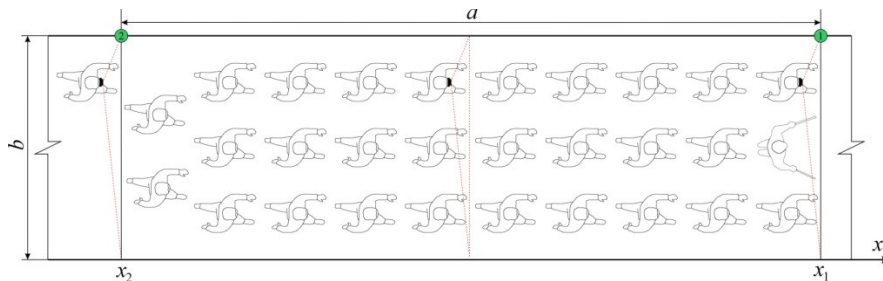


Рисунок 3.2 – Схема руху змішаного потоку людей груп мобільності M1 (96,67 %) та M3 (3,33 %) з проведенням динамічної зйомки [84]

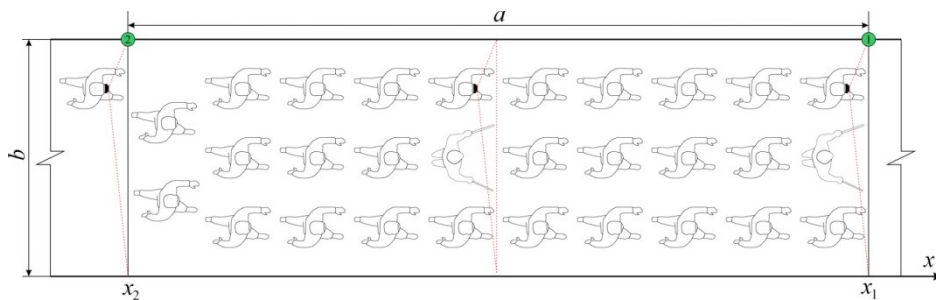


Рисунок 3.3 – Схема руху змішаного потоку людей груп мобільності M1 (93,33 %) та M3 (6,67 %) з проведенням динамічної зйомки [84]

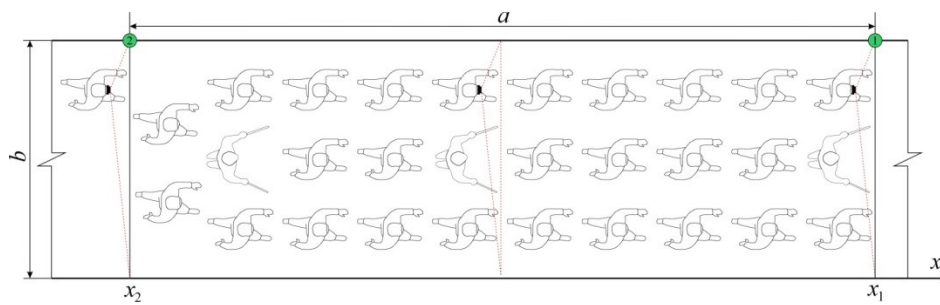


Рисунок 3.4 – Схема руху змішаного потоку людей груп мобільності М1 (90 %) та М3 (10 %) з проведенням динамічної зйомки [84]

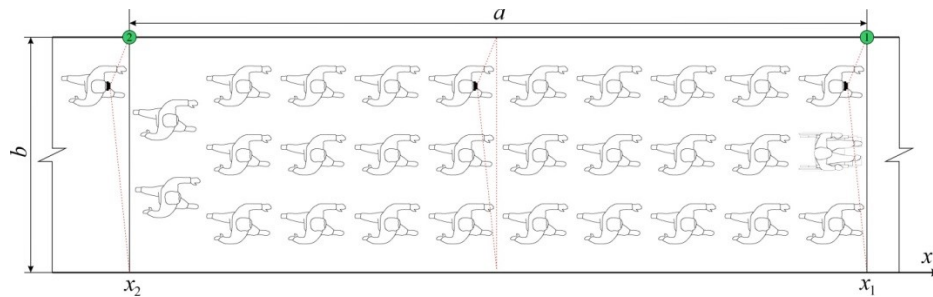


Рисунок 3.5 – Схема руху змішаного потоку людей груп мобільності М1 (96,67 %) та М4 (3,33 %) з проведенням динамічної зйомки [84]

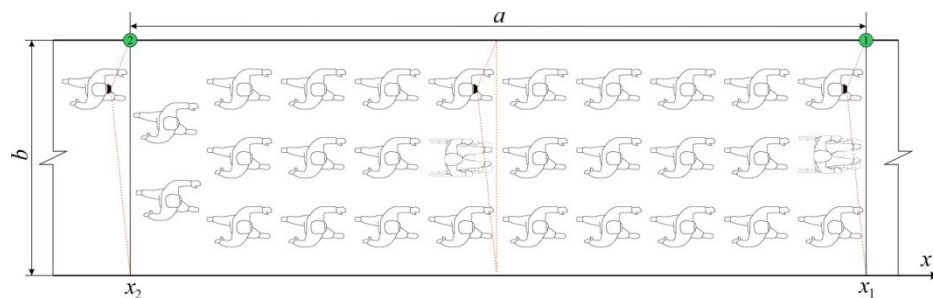


Рисунок 3.6 – Схема руху змішаного потоку людей груп мобільності М1 (93,33 %) та М4 (6,67 %) з проведенням динамічної зйомки [84]

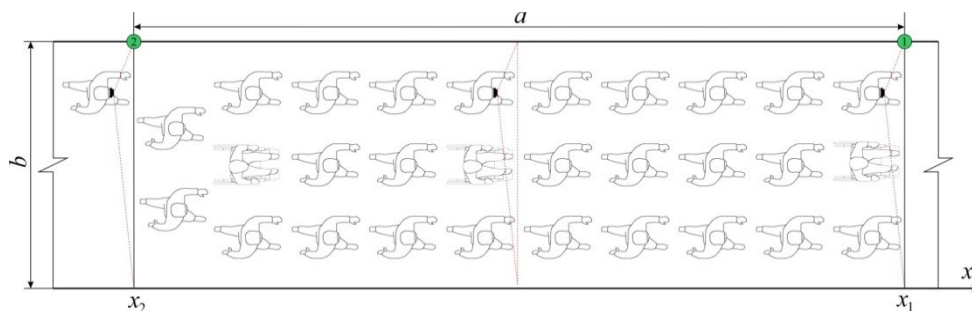


Рисунок 3.7 – Схема руху змішаного потоку людей груп мобільності М1 (90 %) та М4 (10 %) з проведенням динамічної зйомки [84]

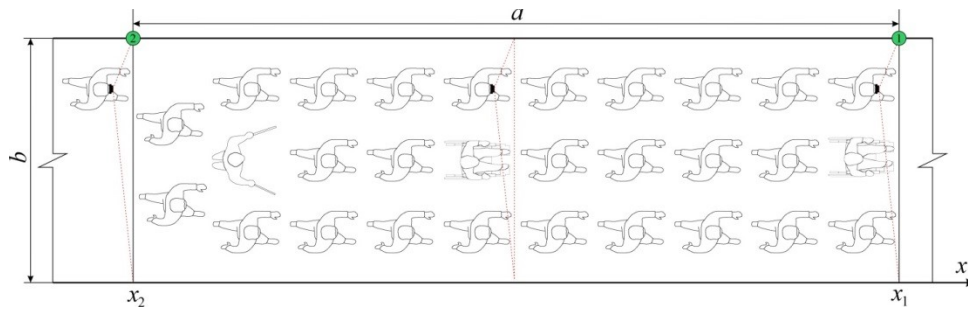


Рисунок 3.8 – Схема руху змішаного потоку людей груп мобільності М1 (90 %), М3 (3,33 %) та М4 (6,67 %) з проведенням динамічної зйомки експерименту [84]

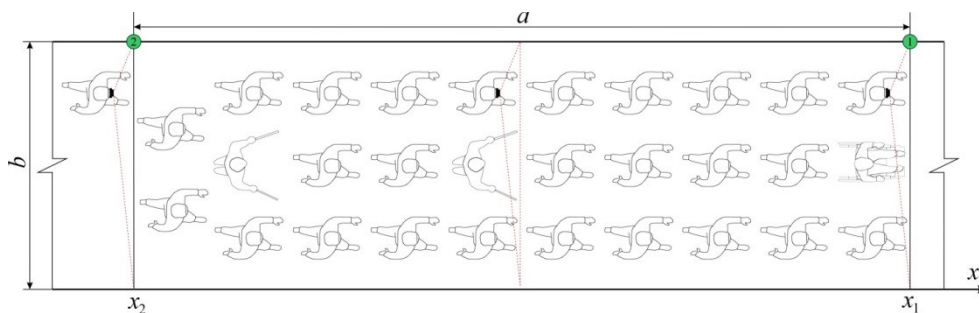


Рисунок 3.9 – Схема руху змішаного потоку людей груп мобільності М1 (90 %), М3 (6,67 %) та М4 (3,33 %) з проведенням динамічної зйомки [84]

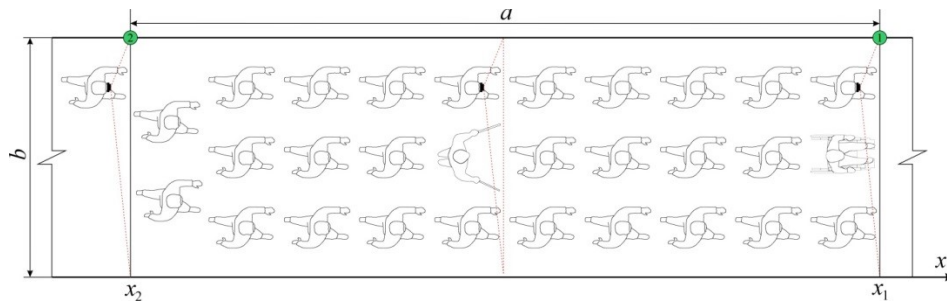


Рисунок 3.10 – Схема руху змішаного потоку людей груп мобільності М1 (93,33 %), М3 (3,335 %) та М4 (3,335 %) з проведенням динамічної зйомки [84]

Кожен із описаних вище варіантів конфігурації потоку передбачав проведення серії із 3 експериментів. Склад людських потоків для проведення експериментальних досліджень наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Структура людських потоків

№ серії дослідів	Частка учасників групи М1, (%)	Частка учасників групи М3 (на опорах), (%)	Частка учасників групи М4 (на кріслах колісних), (%)
1.	100	0	0
2.	96,67	3,33	0
3.	93,33	6,67	0
4.	90	10	0
5.	96,67	0	3,33
6.	93,33	0	6,67
7.	90	0	10
8.	90	3,33	6,67
9.	90	6,67	3,33
10.	93,33	3,335	3,335

Для проведення експериментальних досліджень було використане таке обладнання: опори (милиці); крісла колісні; обладнання для фото та відео зйомки; комп'ютерна техніка; програмне забезпечення для обробки даних; бар'єри для регулювання ширини проходу.

План-схема частини будівлі, у якій проводилися експериментальні дослідження, наведена на рис. 3.11.

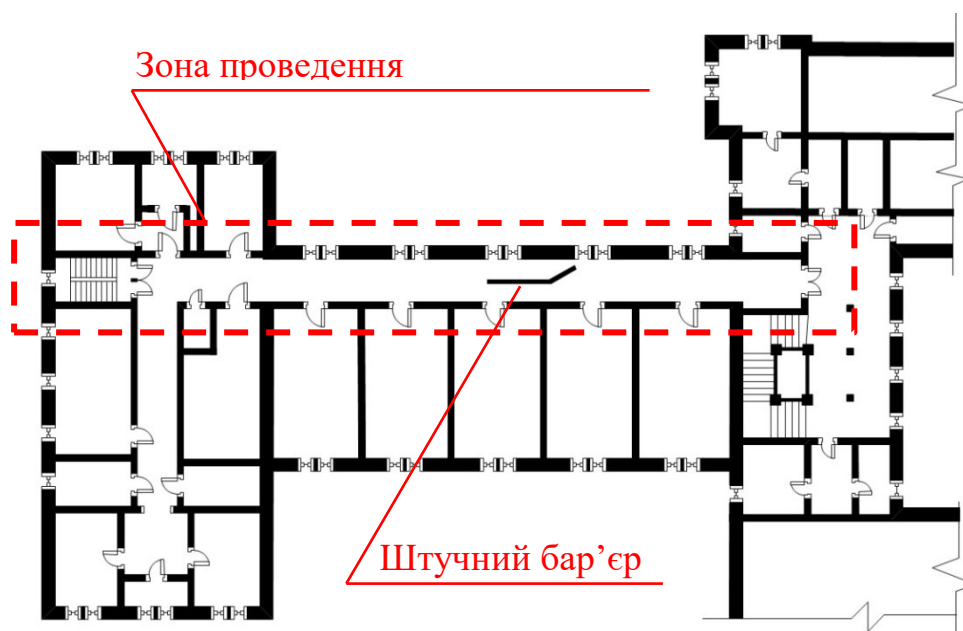


Рисунок 3.11 – Місце проведення експерименту [84]

Загальна кількість учасників експерименту становила 30 осіб. З їх числа обирались агенти (учасники експерименту, що представляли групи мобільності

М3 та М4), які пересувалися на милицях або кріслах колісних. Всі інші учасники експерименту представляли групу мобільності М1 і вільно пересувалися.

В рамках кожної серії дослідів всі учасники формували єдиний потік загальною кількістю 30 осіб. Відсоткове співвідношення кількості агентів груп М3 та М4 змінювалося в межах від 3,33 % до 10 % від загальної кількості групи. Такі співвідношення обрано за статистичними даними, відповідно до яких на більшості житлових та громадських об'єктів (за винятком закладів охорони здоров'я та будинків догляду за людьми похилого віку) одночасно не може перебувати понад 10% осіб із зниженою мобільністю.

Для забезпечення достовірності та репрезентативності отриманих результатів експериментальні дослідження проводились п'ять разів. Кожне повторення експерименту дозволило оцінити варіацію даних та зменшити ймовірність впливу випадкових факторів на результати дослідження. Загалом експеримент склав 415 замірів.

Всі серії експериментів проводилися під чітким керівництвом та контролем науково-педагогічного персоналу, які несли відповідальність за безпеку здобувачів освіти. Перед початком усі учасники пройшли інструктаж з питань техніки безпеки під час проведення експерименту, мети та цілей досліджень.

Кожен експеримент розпочинався за командою організаторів, коли всі учасники та спостерігачі були готові здійснювати відеофіксацію.

На шляху руху учасників, з точки 1 до точки 2 (рис. 3.12), встановлено штучний бар'єр, імітуючий торговельний «острів», що часто зустрічаються в коридорах ТРЦ. На певній ділянці евакуаційного шляху завдовжки 5 метрів, бар'єр зменшував ширину коридору до 1,2 м. Це дозволило отримати додаткові емпіричні дані щодо швидкості руху при великих значеннях щільності потоку.

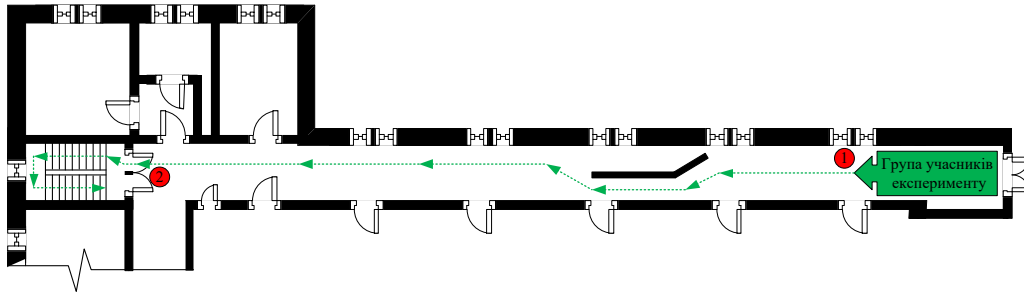


Рисунок 3.12 – Загальна схема експериментальної ділянки евакуаційного шляху [84]

Відеозаписи експериментальних досліджень дали змогу визначити такі параметри руху учасників експерименту: щільність людського потоку на кожній ділянці, час слідування та середню швидкість учасників експерименту. Для збору даних співставлено записи камер, задіяних для відеофіксації які співставлялися між собою. На кожному замірі попарно визначалися координати двох різних учасників руху, які здійснювали відеофіксацію (x_1) та (x_2) в певний момент часу t_n . Після цього визначалася відстань між ними.

$$a(t_n) = x_1(t_n) - x_2(t_n). \quad (3.1)$$

Після цього для моменту часу t_n щільність потоку розраховувалася за формулою:

$$D(t_n) = \frac{N}{(x_1(t_n) - x_2(t_n)) \cdot b}, \quad (3.2)$$

де N – кількість учасників евакуації на ділянці спостереження; b – ширина ділянки руху.

Для наступного моменту часу t_{n+1} аналогічним чином визначалися дані $x_1(t_{n+1})$, $x_2(t_{n+1})$, $a(t_{n+1})$, $D(t_{n+1})$.

Для кожного часового проміжку між замірами було визначено середні значення швидкості (3.3) та щільності (3.4) потоку на пройденій ділянці шляху:

$$V_{сеп} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(x_1(t_{n+1}) - x_1(t_n)) + (x_2(t_{n+1}) - x_2(t_n))}{(t_{n+1} - t_n)}, \quad (3.3)$$

$$D_{сеп} = \frac{1}{2} \cdot (D(t_n) + D(t_{n+1})). \quad (3.4)$$

Таким чином, кожен замір передбачав вимірювання двох параметрів: швидкості руху та відповідної їй щільності потоку. Отримані дані заносилися до бази емпіричних даних, де їх зводили у варіаційні ряди, впорядковані за зростанням щільності. Для кожного інтервалу обчислювалося математичне сподівання, яке відповідало середньому арифметичному значенню для нормального розподілу даних.

3.2 Експериментальне визначення залежності швидкості евакуації відвідувачів, з наявністю серед них маломобільних груп населення М1, М3 та М4, від щільності потоку

Ефективне управління евакуацією людей з ТРЦ під час надзвичайних ситуацій є критично важливим завданням сучасного будівництва та експлуатації таких об'єктів. З огляду на різноманітність груп мобільності відвідувачів, особливої уваги потребує питання взаємодії маломобільних груп населення з основним потоком людей під час евакуації.

Дослідження залежності швидкості руху відвідувачів від щільності потоку, з урахуванням присутності маломобільних осіб, є актуальним як для проектувальників будівель, так і для рятувальних служб. Розкриття цих залежностей дозволяє не тільки прогнозувати поведінку людських потоків у надзвичайних ситуаціях, але й розробляти оптимальні стратегії евакуації, що враховують специфіку різних груп мобільності.

Основною метою цього розділу є експериментальне визначення параметрів руху відвідувачів ТРЦ, серед яких є маломобільні групи населення. Зокрема, увага зосереджується на аналізі взаємозв'язку між швидкістю руху людського потоку та його щільністю, а також впливу на ці параметри відсоткового співвідношення маломобільних осіб у складі потоку. Отримані результати слугуватимуть науковим підґрунтям для удосконалення методик визначення розрахункового часу евакуації людей із приміщень ТРЦ під час пожежі чи інших надзвичайних ситуацій.

Методи проведення натурних спостережень та отримання бази емпіричних даних швидкості змішаних потоків та відповідних їм значень щільності проведено відповідно до [5] та Методики експериментальних досліджень евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності описаної в підрозділі 3.1 та [84].

В експерименті було прийнято, що частка МГН складає не більше 10 % від загальної кількості учасників, що відповідає вимогам нормативних документів і статистичним даним. Зокрема, такий підхід базується на рекомендаціях відповідних національних стандартів, які регламентують проектування будівель та евакуаційних систем з урахуванням потреб осіб з обмеженою мобільністю. Крім того, використання зазначеного відсоткового показника узгоджується з демографічною статистикою щодо частки населення з обмеженими можливостями, що підтверджує репрезентативність даних для аналізу процесів евакуації.

Результати зводилися у варіаційні ряди за інтервалами щільності в порядку їх зростання. За цими математичними сподіваннями будували криві.

Спочатку були усунуті так звані «грубі похибки вимірювань», тобто результати, значень яких значно відрізнялися від очікуваних. Наявність таких результатів можна пояснити несподіваними зупинками та затримками під час руху, впливом зовнішніх факторів на учасників евакуації, похибками в підрахунках тощо.

Після цього було вжито заходів щодо мінімізації випадкових похибок. Для цього у табличному редакторі Microsoft Excel було виконано статистичну обробку результатів вимірювань [98]. Оскільки випадкові похибки вимірювань обумовлені великою кількістю незалежних випадкових складових, згідно з центральною граничною теоремою теорії ймовірностей, розподіл випадкових похибок вимірювання буде близьким до нормального.

Після видалення з масиву вимірювань грубих похибок, результати визначали, виходячи з математичного сподівання, яке для нормального розподілу є середнім арифметичним:

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i, \quad (3.9)$$

Випадкове відхилення кожного окремого вимірювання становить:

$$\vartheta_i = V_i - \bar{V}, \quad (3.10)$$

Випадкову похибку оцінювали за середньоквадратичним відхиленням S результатів вимірювань:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \vartheta_i^2}{n-1}}, \quad \sigma[\bar{V}] = \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (3.11)$$

Після обчислення середньоквадратичних відхилень результатів вимірювань швидкостей руху евакуаційного потоку було визначено довірчі інтервали для цих значень: $(\bar{V} - \Delta_{\partial}, \bar{V} + \Delta_{\partial})$.

де $\bar{V}$ – математичне сподівання швидкості потоку для певного інтервалу щільності; Δ_{∂} – довірчі межі похибки вимірювання.

Довірча ймовірність вимірювання визначає ймовірність того, що значення швидкості руху потоку, отримане під час вимірювань, потрапить у заданий довірчий інтервал. Ця ймовірність виражається у частках одиниці або у відсотках і характеризує достовірність вимірювання.

В нашому випадку довірчі межі було визначено за формулою Стюдента:

$$\Delta_{\partial} = \pm k_t \cdot \bar{\sigma}(\bar{V}) = \pm 2 \cdot \bar{\sigma}(\bar{V}). \quad (3.12)$$

де k_t – коефіцієнт розподілу Стюдента, який залежить від заданої ймовірності P і числа вимірювань n .

Залежності швидкості від щільності потоку описувалися на основі взаємозв'язку, який узагальнено можна виразити формулою лінійної залежності:

$$V_D = V_0 - a(D - D_0), \text{ при } D > D_0 \quad (3.13)$$

де V_D – швидкість руху потоку при щільності потоку D , м/хв.;

D – поточне значення щільності потоку, люд./м²;

D_0 – значення щільності потоку, після досягнення якого збільшення щільності призводить до зменшення швидкості, люд./м²;

V_0 – швидкість вільного руху (в умовах, при яких щільність не впливає на рух учасників), м/хв.;

a – коефіцієнт, який відображає характер впливу щільності людського потоку на його швидкість.

Таким чином, при перевищенні деякого порогу щільності потоку D_0 швидкість вільного руху V_0 починала зменшуватися і набувала певного значення V_D . Тобто абсолютне зменшення швидкості становило:

$$\Delta V = V_0 - V_D, \quad (3.14)$$

а відносно:

$$R = \frac{V_0 - V_D}{V_0}. \quad (3.15)$$

Відповідно, залежність швидкості від щільності будувалася за емпіричними даними, для апроксимації яких використовувалася лінійна функція на основі закону пропорційності або прямої пропорційності.

$$R = a(D - D_0). \quad (3.16)$$

Для кожної конфігурації змішаного потоку будувався свій варіаційний ряд емпіричних даних і для кожного такого ряду визначалося значення a_j та D_{0j} (де j – номер відповідного ряду). З цією метою виконувалася апроксимація лінійною функцією виду $y = AD + B$. Коефіцієнт $a_j = A_j$. Значення D_0 розраховувалося автоматичним продовженням лінії тренда до перетину з віссю абсцис $y = V_{0j}$. Координата в точці перетину і дорівнювала значенню D_0 . Координата x точки перетину відповідала значенню D_0 . Отримані дані дозволяли побудувати лінійні залежності швидкості від щільності для різних відсоткових співвідношень кількості агентів груп М1, М3 та М4 в евакуаційних потоках.

За результатами експерименту було побудовано графік залежності швидкості від щільності евакуаційних потоків з різним відсотковим співвідношенням учасників груп мобільності М1 та М3 представлений на рис. 3.13. В експерименті було враховано різні відсоткові співвідношення груп маломобільних осіб (М3), а саме 3,33 %, 6,67 % та 10 %.

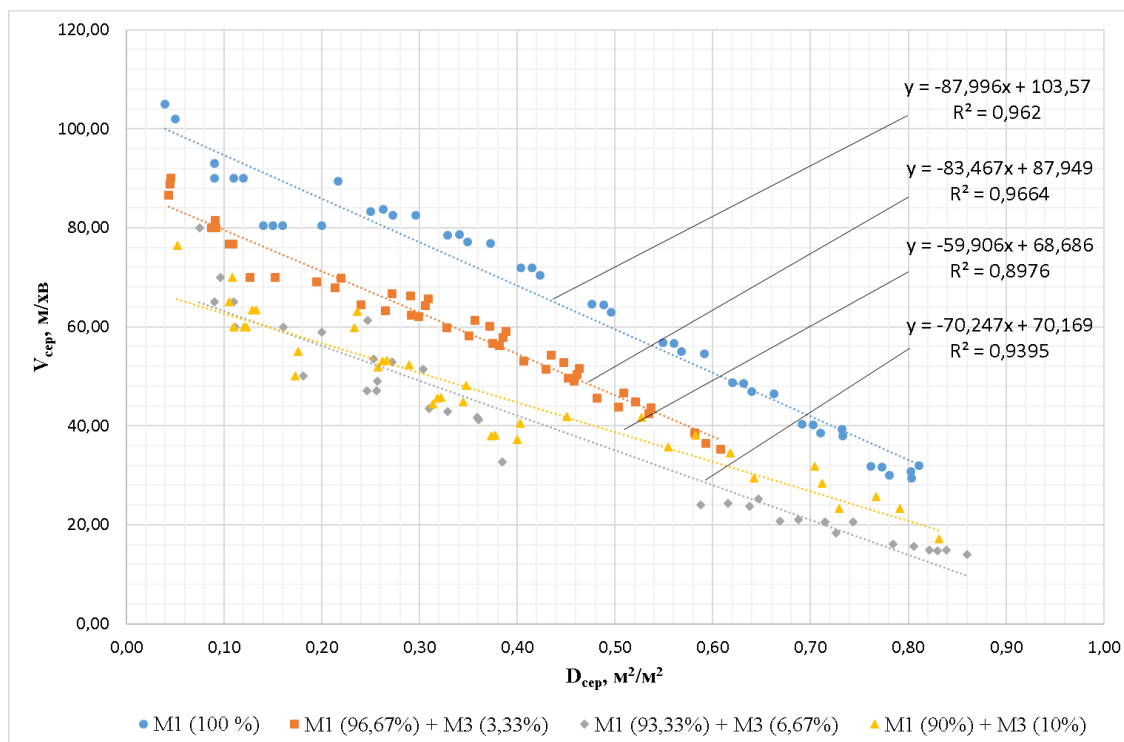


Рисунок 3.13 – Залежності швидкості евакуаційних потоків від щільності учасників груп мобільності М1 та М3 з різним відсотковим співвідношенням згідно з даними натурного експерименту

Графік ілюструє залежність швидкості евакуації від щільності евакуаційних потоків для різних відсоткових співвідношень учасників груп мобільності М1 та М3. На графіку представлені чотири лінійні регресійні моделі для наступних співвідношень:

Синім кольором позначені дані для випадку, коли всі учасники належать до групи мобільності М1 (100%). Лінія регресії для цього набору даних має рівняння: $y = -87,996x + 103,57$ з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,962$.

Помаранчевим кольором позначені дані для співвідношення М1 (96,67%) та М3 (3,33 %). Лінія регресії для цього набору даних має рівняння: $y = -83,467x + 87,949$ з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,9664$.

Сірим кольором позначені дані для співвідношення М1 (93,33 %) та М3 (6,67 %). Лінія регресії для цього набору даних має рівняння: $y = -70,247x + 70,169$ з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,9395$.

Жовтим кольором позначені дані для співвідношення М1 (90%) та М3 (10%). Лінія регресії для цього набору даних має рівняння: $y = -59,906x + 68,686$ з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,8976$.

Графік показує, що зі збільшенням відсотка маломобільних осіб (М3) у загальному потоці швидкість евакуації знижується. Це пов'язано з тим, що маломобільні особи потребують більше часу для пересування, що збільшує загальну тривалість евакуації. Високі значення коефіцієнтів детермінації (R^2) для всіх регресійних моделей свідчать про те, що отримані моделі точно відображають залежність швидкості евакуації від щільності потоку, що дозволяє використовувати ці моделі для прогнозування в подальшому етапі дослідження.

В результаті наступного експерименту було створено графік, що ілюструє залежність швидкості евакуації від щільності евакуаційних потоків з різним відсотковим співвідношенням учасників груп мобільності М1 та М4 (рис. 3.14). В експерименті розглядалися різні відсоткові співвідношення груп маломобільних осіб (М4), а саме 3,33 %, 6,67 % та 10 %.

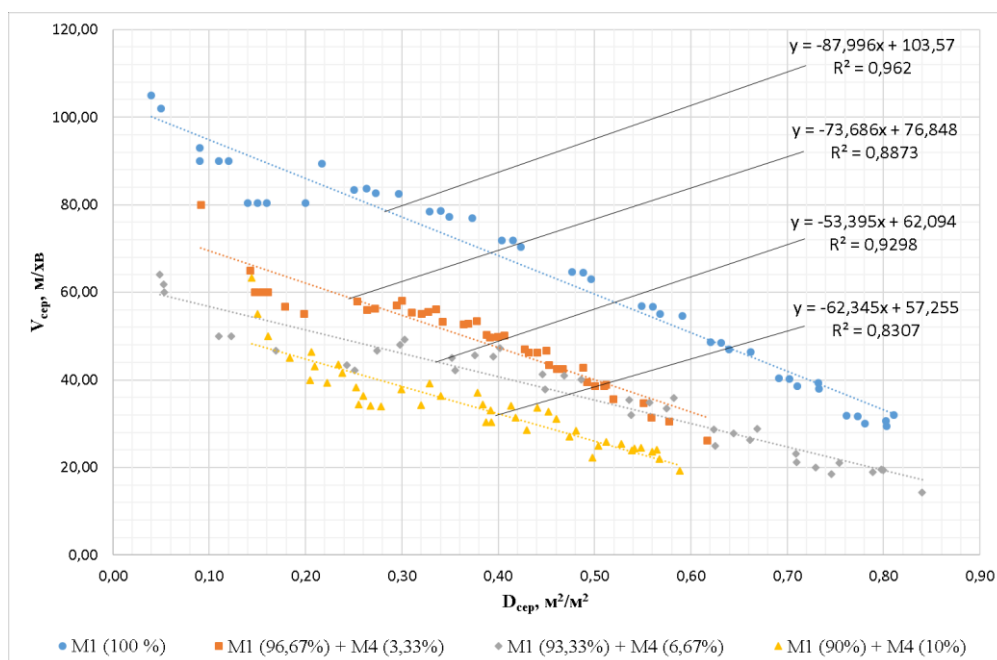


Рисунок 3.14 – Залежності швидкості евакуаційних потоків від щільності учасників груп мобільності M1 та M4 з різним відсотковим співвідношенням згідно з даними натурного експерименту

Графік ілюструє залежність швидкості евакуації від щільності евакуаційних потоків для різних відсоткових співвідношень учасників груп мобільності M1 та M4. На графіку представлені чотири лінійні регресійні моделі для наступних співвідношень:

Синім кольором позначені дані для випадку, коли всі учасники належать до групи мобільності M1 (100 %). Лінія регресії для цього набору даних має рівняння: $y = -87,996x + 103,57$ з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,962$.

Помаранчевим кольором позначені дані для співвідношення M1 (96,67 %) та M4 (3,33 %). Лінія регресії для цього набору даних має рівняння: $y = -73,686x + 76,848$ з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,8873$.

Сірим кольором позначені дані для співвідношення M1 (93,33 %) та M4 (6,67 %). Лінія регресії для цього набору даних має рівняння: $y = -53,395x + 62,094$ з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,9298$.

Жовтим кольором позначені дані для співвідношення M1 (90 %) та M4 (10 %). Лінія регресії для цього набору даних має рівняння: $y = -62,345x + 57,255$ з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,8307$.

Графік демонструє, що зі зростанням відсотка маломобільних осіб (M4) у загальному потоці знижується швидкість евакуації. Це пояснюється тим, що маломобільні особи потребують більше часу на переміщення, що призводить до збільшення загальної тривалості евакуації. Високі значення коефіцієнтів детермінації (R^2) для всіх регресійних моделей свідчать про точність отриманих моделей у відображенні залежності швидкості евакуації від щільності потоку. Це дозволяє використовувати ці моделі для прогнозування на наступних етапах дослідження.

У даному експерименті було створено графік, який показує, як швидкість евакуації залежить від щільності евакуаційних потоків з різним відсотковим співвідношенням учасників груп мобільності M1, M3 та M4 (рис. 3.15). Досліджувалися різні відсоткові співвідношення груп маломобільних осіб (M4): 3,33 %, 6,67% та 10 %.

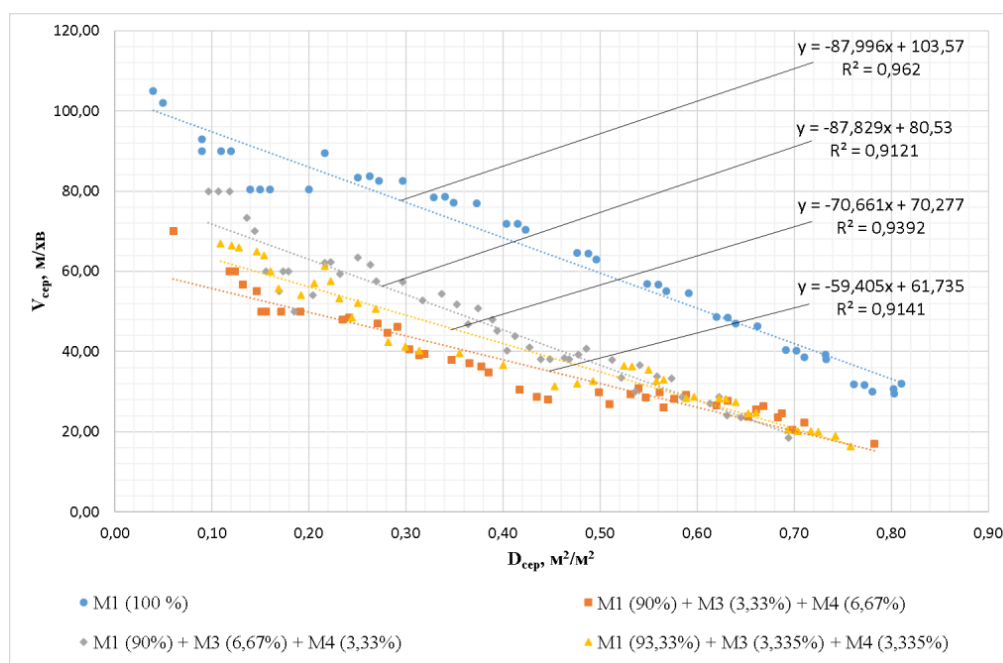


Рисунок 3.15 – Залежності швидкості евакуаційних потоків від щільності учасників груп мобільності M1, M3 та M4 з різним відсотковим співвідношенням згідно з даними натурного експерименту

Графік показує, як змінюється швидкість евакуації від щільності евакуаційних потоків залежно від різних відсоткових співвідношень учасників груп мобільності М1, М3 та М4. На графіку зображені чотири лінійні регресійні моделі для таких співвідношень:

Синім кольором позначені дані для випадку, коли всі учасники належать до групи мобільності М1 (100%). Лінія регресії для цього набору даних має рівняння: $y = -87,996x + 103,57$ з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,962$.

Помаранчевим кольором позначені дані для співвідношення М1 (96,67 %), М3 (3,33 %) та М4 (6,67 %). Лінія регресії для цього набору даних має рівняння: $y = -59,405x + 61,735$ з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,9141$.

Сірим кольором позначені дані для співвідношення М1 (96,67 %) М3 (6,67 %) та М4 (3,33 %). Лінія регресії для цього набору даних має рівняння: $y = -87,829x + 80,53$ з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,9121$.

Жовтим кольором позначені дані для співвідношення М1 (96,67 %), М3 (3,335 %) та М4 (3,335 %). Лінія регресії для цього набору даних має рівняння: $y = -70,661x + 70,277$ з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,9392$.

На основі аналізу результатів експерименту впливає, що швидкість евакуації суттєво залежить від складу учасників груп мобільності М1, М3 та М4. Дані на графіку показують, що при участі лише учасників групи М1 (100 %) швидкість евакуації є найнижчою і має значення $y = -87,996x + 103,57$ з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,962$. Інші конфігурації учасників, такі як М1 (96,67 %), М3 (3,33 %) та М4 (6,67 %), М1 (96,67 %), М3 (6,67 %) та М4 (3,33 %), або М1 (96,67%), М3 (3,335%) та М4 (3,335%), також показують зниження швидкості евакуації, проте на різному рівні, з відповідними лініями регресії і коефіцієнтами детермінації $R^2 = 0,9141$, $R^2 = 0,9121$ та $R^2 = 0,9392$ відповідно. Такі результати підкреслюють важливість оптимального розподілу мобільних та маломобільних осіб під час евакуаційних заходів.

Проведений аналіз продемонстрував, що завдяки високим коефіцієнтам детермінації, моделі отримані за допомогою експериментальних даних точно

відображають вплив маломобільних осіб на швидкість евакуації. Високі значення коефіцієнтів детермінації свідчать про те, що моделі мають високу прогностичну здатність і можуть бути використані для прогнозування швидкості евакуації в реальних умовах.

Побудова відповідних графіків дозволила краще зрозуміти динаміку евакуаційних потоків з урахуванням різних категорій мобільності учасників. Крім того, отримані дані натурного експерименту дозволяють використовувати їх у подальшому регресійному аналізі та побудові математичної моделі.

Результати експериментальних досліджень евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності наведено в додатку В.

3.3 Експериментальні дослідження евакуації з торговельно-розважального центру з перебуванням у ньому осіб груп мобільності М4 та їх рятування пожежно-рятувальними підрозділами за допомогою пожежних ліфтів

Будування суспільства, що ґрунтується на принципах гуманності та демократії, вимагає збільшення уваги до всіх категорій населення, особливо до вразливих та хворих груп. До цих категорій можна віднести маломобільні групи, які можуть потребувати підтримки під час переміщення, отримання послуг, інформації або орієнтування у просторі.

Згідно з [3], до маломобільних груп населення відносяться особи з інвалідністю, люди з тимчасовими обмеженнями в русі, вагітні жінки, особи похилого віку тощо. Серед цих груп, що відвідують ТРЦ, є відвідувачі, які пересуваються лише на кріслах-колісних (група мобільності М4 відповідно до [3]), і присутність таких осіб безпосередньо може впливати на процеси загальної евакуації людей.

З метою доповнення та більш глибокого вивчення особливостей евакуації людей з фізичними обмеженнями проведений натурний експеримент. Він спрямований на визначення залежності швидкості руху людських потоків під час евакуації від наявності осіб з інвалідністю, які пересуваються лише на кріслах

колісних. В рамках експерименту досліджувалося рятування цих осіб за допомогою пожежних ліфтів пожежно-рятувальними підрозділами в ТРЦ Smart Plaza Obolon, що знаходиться в місті Києві.

Для зручності отримання емпіричних даних експеримент розділено на дві частини.

Метою першої частини проведення експерименту в ТРЦ було визначення залежності швидкості руху людських потоків під час евакуації від перебування в них осіб з інвалідністю, які пересуваються на кріслах колісних, та їх щільності на різних ділянках шляху. Другою частиною експерименту було визначення часу рятування людей, які пересуваються на кріслах колісних із пожежобезпечних зон, з яких вони можуть евакуйовуватися більш тривалий час або знаходитись в ній до прибуття пожежно-рятувальних підрозділів (п. 10.7 [3]). Це дало змогу дослідити питання рятування осіб з інвалідністю із пожежобезпечних зон пожежно-рятувальними підрозділами ДСНС України за допомогою пожежних ліфтів в умовах наближених до реальних.

Дослідження поведінки людей та руху людських потоків під час пожежі, проведені під час анонсованих для всіх відвідувачів та персоналу експериментальних евакуацій або навчань, позбавлені фактору несподіванки і загрози для життя.

У зазначеному дослідженні відтворювалась максимально наближена до реальної ситуація – неанонсована евакуація, коли ні персонал, ні відвідувачі не знали про її навчальні цілі. Відеокамерами фіксувалася поведінка людей та рух людських потоків з моменту спрацювання системи сповіщення до моменту виходу з будівлі та завершення рятування людей із пожежобезпечних зон пожежно-рятувальними підрозділами.

Про проведення експерименту та його цілі було відомо лише адміністрації ТРЦ, що своєю чергою надало можливість максимально наблизити змодельовану ситуацію до реальної.

Для здобуття та аналізування даних щодо поведінки, руху змішаних людських потоків та евакуації маломобільних людей із пожежобезпечних зон

пожежно-рятувальним підрозділами використано метод отримання даних за допомогою фото- та відеофіксації (рис. 3.16).

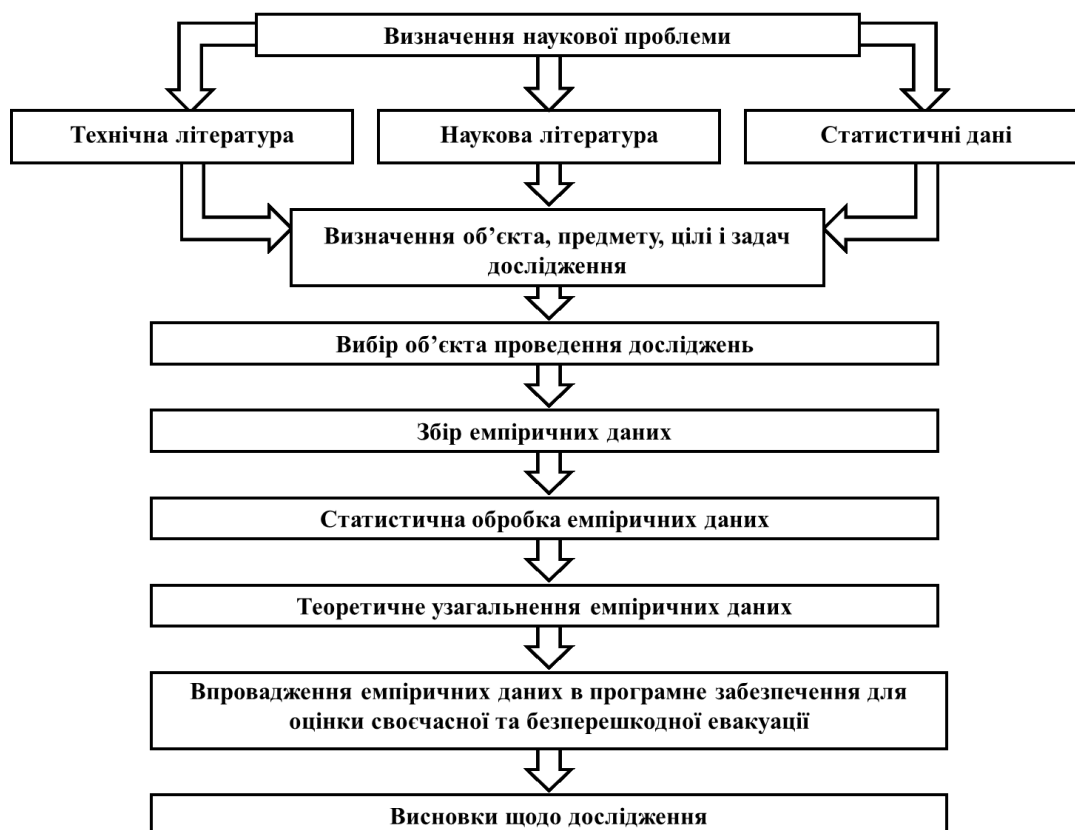
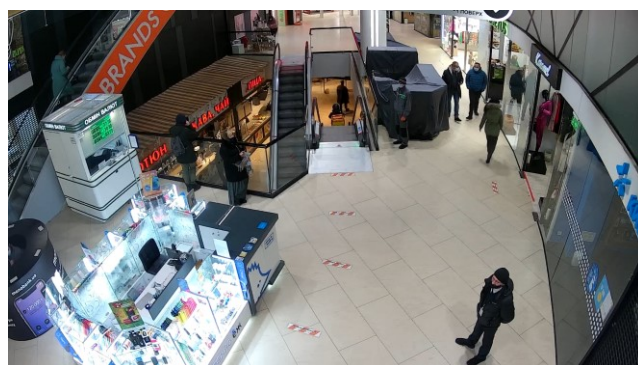


Рисунок 3.16 – Блок-схема методики дослідження [84]

ТРЦ, в якому проводився експеримент являє собою триповерхову будівлю і є частиною житлового комплексу. Загальна його площа становить 15 000 м², з яких 10 000 м² – орендуються (рис. 3.17).



а)



б)

Рисунок 3.17 – ТРЦ Smart Plaza Obolon, в якому проводився натурний експеримент [37, 84]: а) – зовнішній вигляд будівлі; б) – вигляд торговельного центру зсередини

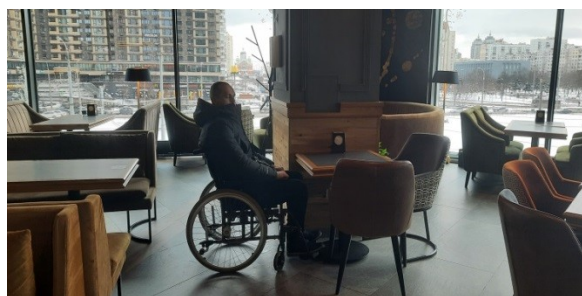
У підвалі ТРЦ розташований супермаркет площею 3200 м² та кілька невеликих торговельних площ. Заклад швидкого харчування займає 440 м² на двох рівнях і має 150 місць. На другий поверх, де розміщені магазини та ресторани, ведуть ескалатори та ліфти.

Згідно зі сценарієм, пожежу в супермаркеті виявляє працівник, який повідомляє адміністрацію та викликає ДСНС. Адміністрація ТРЦ оперативно оголошує евакуацію через систему оповіщення. Після сигналу про пожежу всі евакуаційні виходи автоматично розблоковуються. Персонал швидко визначає найбезпечніші шляхи евакуації.

Відвідувачів, котрі пересуваються лише на кріслах колісних (далі – відвідувачі на кріслах колісних), було поділено на дві групи і розміщено у найвіддаленіших точках від пожежобезпечних зон, до яких вони мали евакуюватися (рис. 3.18) і вже там чекати на пожежно-рятувальні підрозділи для порятунку. Група № 1 була розміщена у найвіддаленішій точці супермаркету «Сільпо», що знаходиться на підвальному поверсі. Група № 2 перебувала у найвіддаленішій точці ресторану «Євразія», розташованого на другому поверсі ТРЦ. Відвідувачі на кріслах колісних знаходились на своїх місцях до отримання сигналу про небезпеку, після чого кожна група прямувала до своєї пожежобезпечної зони, яка знаходилась в ліфтовому холі на відповідному поверсі.



а)



б)

Рисунок 3.18 – Відвідувачі на кріслах колісних розміщені у найвіддаленіших точках ТРЦ [37, 84]: а) – група № 1 «Сільпо»; б) – група № 2 «Євразія»

При отриманні сигналу про пожежу ліфт автоматично переходить у режим «пожежна небезпека», спускаючись на основний посадковий поверх і залишаючи двері відкритими, після чого рух кабіни блокується. Режим «транспортування пожежних підрозділів» активується рятувальниками за допомогою спеціального ключа, дозволяючи керування ліфтом тільки з кабіни для рятування людей. Більшість відвідувачів ТРЦ—жінки, вік яких переважно від 18 до 60 років.

Дані щодо статі відвідувачів та персоналу ТРЦ наведено в таблиці 3.2, з якої видно, що більшість відвідувачів складають жінки, близько третини – чоловіки. Здебільшого вік людей варіювався в межах від 18 до 60 років.

Таблиця 3.2

Характеристика, кількість покупців та персоналу

Характеристика	Кількість, (%)
Чоловіки	26,71
Жінки	70,55
Особи з інвалідністю, які пересуваються на кріслах колісних (чоловіки)	2,74

Приблизно 60 – 70 % відвідувачів були розосереджені між продуктовими відділами в супермаркеті на підвальному поверсі, інші перебували у магазинах одягу та побутової техніки, що знаходились на першому і другому поверхах.

Сигнал тривоги по-різному вплинув на відвідувачів ТРЦ. У момент тривоги більшість відвідувачів була залучена в процес розглядання та вибору товарів. Найменшого впливу від сигналу зазнали покупці, які вже розраховувалися за товар, стояли в черзі або тільки заходили в супермаркет. Найбільше сигнал вплинув на людей, які лише обирали товари.

Варто зауважити, що оповіщення про евакуацію було чутно не всім відвідувачам, які перебували на території ТРЦ, і частина із них почала евакуацію лише після вказівок персоналу. Це свідчить, що персонал реагував на сигнал пожежної небезпеки значно швидше та відповідальніше, ніж відвідувачі.

У разі спрацювання сигналізації відвідувачі починали оглядатися на всі боки в пошуках, ймовірно, причини спрацювання сигналізації, починали

коментувати та обговорювати між собою ситуацію для підтвердження сигналу тривоги. Після цього основна кількість відвідувачів, не виявивши ознак пожежі, почали ігнорувати сигнал, приймаючи його за хибний. Лише декілька із них зреагували миттєво і одразу почали прямувати до евакуаційних виходів, уточнюючи свій шлях у персоналу. Можливо ця поведінка пов'язана з недостатньою дисциплінованістю, попереднім досвідом навчальних тривог або, як у разі з відвідувачами, що швидко відреагували на сигнал, турботою про власну безпеку чи близьких, з якими вони прийшли.

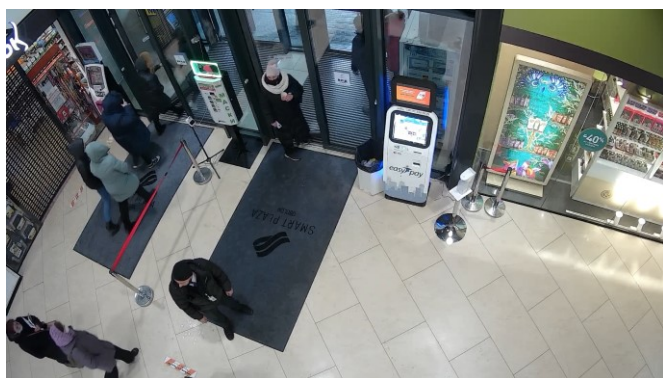
Надалі, дії та вказівки персоналу, постійно лунаючий сигнал тривоги, рух людей до виходів переконували відвідувачів у необхідності зреагувати на ситуацію і змушували їх евакуйовуватися.

Цей процес був доволі затяжним, тому зроблено висновок, що саме в таких випадках спостерігається максимальний час затримки початку евакуації. Фактором, який безпосередньо впливав на поведінку відвідувачів, був вплив на них з боку персоналу, а саме – служби безпеки ТРЦ. Як тільки співробітники служби безпеки давали вказівку залишити приміщення у зв'язку із загрозою, відвідувачі починали виходити з приміщень.

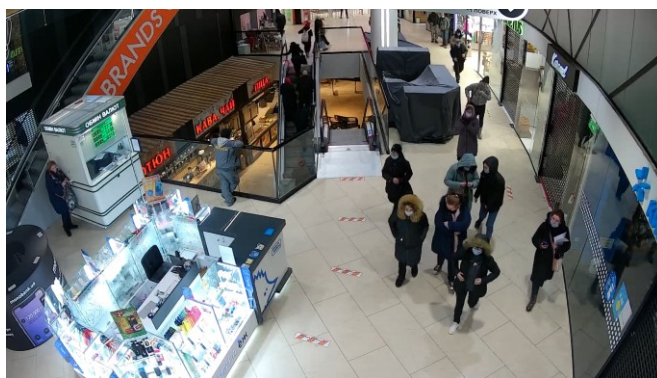
Найбільш відчутною залежність поведінки відвідувачів була там, де відбувалося безпосереднє спілкування між персоналом та відвідувачами, а саме – відвідувачі не починали евакуацію доти, доки їх не починав просити про це персонал.

Встановлено, що загальний час евакуації відвідувачів без особливих потреб та персоналу склав 10,61 хв. На рис. 3.19 наведено фрагменти евакуації відвідувачів та персоналу з ТРЦ.

На підставі отриманих відеозаписів було встановлено, що щільність руху людських потоків на шляхах евакуації не перевищувала значення $D = 1$ люд/м². Протягом всього часу свого пересування відвідувачі на кріслах колісних перетиналися з людьми, які не мають обмежень щодо мобільності, у такий спосіб утворюючи змішані потоки людей різної мобільності.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.19 – Фрагменти евакуації відвідувачів без особливих потреб та персоналу [37, 84]

У процесі спостереження також відмічалось, що персонал усіляко намагався допомогти відвідувачам на кріслах колісних (відчинення дверей, допомога під час поворотів тощо), що своєю чергою дещо спрощувало їх пересування. Фрагменти прямування відвідувачів на кріслах колісних до пожежобезпечних зон наведено на рис. 3.20.



а)



б)

Рисунок 3.20 – Фрагменти прямування відвідувачів на кріслах колісних до пожежобезпечних зон [37, 84]: а) – фрагмент евакуації групи № 1 «Сільпо»; б) – фрагмент евакуації групи № 2 «Євразія»

Схеми евакуації відвідувачів, котрі пересувалися на кріслах колісних з найвіддаленішої точки до пожежобезпечних зон, з яких мало проводитись їх рятування, наведено на рис. 3.21, а отримані дані руху – в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Дані, отримані під час руху відвідувачів на кріслах колісних

Група	Відстань, (м)	Час, (хв)	Швидкість, (м/хв)
Група №1 «Сільпо»	122,31	2,38	51,39
Група №2 «Євразія»	80,25	2,01	39,93

Після того, як групи відвідувачів на кріслах колісних опинилися в своїх пожежобезпечних зонах, вони залишалися там до моменту прибуття пожежно-рятувальних підрозділів.



а)

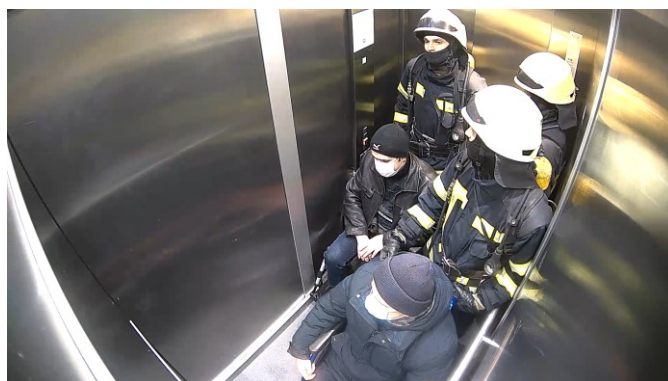


Рисунок 3.21 – Схеми евакуації відвідувачів на кріслах колісних з найвіддаленішої точки до пожежобезпечних зон [37, 84]: а) – схема евакуації групи № 1 «Сільпо»; б) – схема евакуації групи № 2 «Євразія»

Після прибуття рятувальники увімкнули режим «транспортування пожежних підрозділів» за допомогою спеціального ключа. Керування ліфтом здійснювали тільки з кабіни, що давало змогу зупиняти ліфт з панелі керування кабіни на необхідних поверхах, з яких проводилось рятування людей із пожежобезпечних зон. Фрагменти рятування відвідувачів на кріслах колісних наведено на рис. 3.22.



а)



б)



в)

г)

Рисунок 3.22 – Фрагменти рятування відвідувачів на кріслах колісних з пожежобезпечних зон [37, 84]

У зв'язку з тим, що рятування потребували дві групи відвідувачів, старшим підрозділу, відрядженого для рятування, було ухвалено рішення поділити підрозділ також на дві групи – по дві особи. Спочатку група рятувальників була доправлена до місця розташування групи № 2 «Євразія», а друга група рятувальників – до місця розташування групи № 1 «Сільпо» і одразу розпочала рятування, розмістивши відвідувачів в кабіні ліфта і доставивши їх у пожежобезпечну зону, розташовану на першому поверсі (рис. 3.23), з якої вже відвідувачі на кріслах колісних вивозились безпосередньо за межі будівлі. Для отримання більшої кількості результатів відвідувачів із групи № 2 «Євразія» рятували по одній особі. Через те, що у розпорядженні рятувальників був лише один пожежний ліфт, група № 2 «Євразія» разом із рятувальниками була змушена чекати доти, доки рятування не завершить група № 1 «Сільпо», що своєю чергою призвело до затримки рятування групи № 2 «Євразія», час затримки склав 1,85 хв. Загальний час рятування відвідувачів, що пересувалися на кріслах колісних з пожежобезпечних зон назовні склав 5,55 хв.

Загальний час рятування відвідувачів, які пересувались на кріслах колісних, в який входить час прямування до пожежобезпечної зони, час очікування на пожежно-рятувальні підрозділи та рятування, склав 9,81 хв.

Отримані дані часу рятування з пожежобезпечних зон наведені в таблиці 3.4. Для порівняння за допомогою моделі індивідуально-потокowego руху людей [5] було проведено розрахунок часу евакуації з будівлі ТРЦ на основі

вихідних даних, отриманих під час експериментів. На підставі вихідних даних та за результатами розрахунків розрахунковий час евакуації людей з ТРЦ від найвіддаленішого місця їх перебування до виходу назовні, з урахуванням часу початку евакуації людей (60 с) відповідно до [5], складає 9,7 хв.

Дані щодо експериментального та розрахункового часу евакуації людей відповідно до [5] з будівлі ТРЦ під час умовної пожежі наведено в таблиці 3.5.



Рисунок 3.23 – Схема рятування відвідувачів на кріслах колісних з пожежобезпечної зони, розташованої на першому поверсі за межі будівлі [37, 84]

Таблиця 3.4

Дані, отримані під час рятування відвідувачів на кріслах колісних

Група	Час прямування пожежно-рятувального підрозділу до групи (хв)	Час розміщення відвідувачів у ліфті (с)	Час рятування з пожежобезпечної зони до виходу з будівлі (хв)
Група №1 «Сільпо»	1,48	13,2	1,58
Група №2 «Євразія»	1,98	17,6	4,28

Таблиця 3.5

Експериментальний та розрахунковий час евакуації людей з ТРЦ

Методи вимірювання	Час евакуації (хв)
Розрахунковий час евакуації людей	9,7
Експериментальний час евакуації відвідувачів та персоналу (група М1)	10,61
Експериментальний час евакуації відвідувачів на кріслах колісних з пожежобезпечних зон (група М4)	5,55
Загальний експериментальний час евакуації відвідувачів на кріслах колісних (група М4)	9,81

3.4 Моделювання експериментальних досліджень евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності за допомогою програмного забезпечення

Комп'ютерні моделі надають можливість відтворити різні сценарії надзвичайних ситуацій, від пожеж та землетрусів до природних катастроф, та допомагають зрозуміти, як люди реагують у стресових ситуаціях.

Проведення експериментів у віртуальному середовищі дає змогу аналізувати різні варіанти інфраструктури, визначаючи оптимальне розташування виходів, шляхів евакуації та зон безпеки. Це сприяє покращенню планування будівель, вулиць та інших споруд з метою забезпечення максимальної безпеки та легкості евакуації.

Однією з головних переваг експериментів в області евакуації є їхня здатність до тестування різних стратегій. Зазначене допомагає виявити недоліки у планах евакуації й розробити оптимальні та ефективні методи реагування на надзвичайні ситуації.

Завдяки проведенню експериментів у віртуальному середовищі відбувається підвищення підготовки персоналу та населення до надзвичайних ситуацій.

Використання комп'ютерних моделей у поєднанні з експериментами в області евакуації дає змогу розробляти та вдосконалювати стратегії та плани дій, які рятуватимуть життя та зменшуватимуть ризики для населення в умовах небезпеки.

3.4.1 Математичний алгоритм моделі

Під час розрахунку кожна людина приймається як окремий агент, слідування якого обробляється рівнянням руху. Такий підхід дозволяє кожному агенту мати свої особисті властивості та стратегії втечі. Агенти відчують сили впливу при контактні, а також психологічні та рухові сили та моменти в які це відбувається. Отримані рівняння рухів для поступального і обертального моментів свободи розв'язуються методами дисипативної динаміки частинок. Таким чином, модель використовує безперервний час і простір для відстеження траєкторій агентів. Модель функції реакції використовується для вибору шляхів виходу.

Як вихідна точка алгоритму руху агентів використовується метод групи Хельбінга, де вводиться так звана «соціальна сила» для збереження розумної відстані до стін та інших агентів (рис. 3.24). Ця модель коротко описана нижче. Для більш детального опису дивіться статті групи Хельбінга [85–88] і посилання в них. Для модифікації подання агента з одним колом на представлення з трьома колами [89–93].

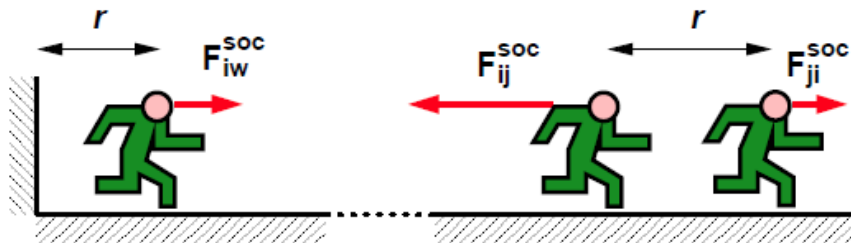


Рисунок 3.24 – Поняття соціальної сили [91]

Щоб стежити за траєкторіями агентів під час розрахунку. Кожен агент дотримується власного рівняння руху:

$$m_i \frac{d^2 x_i(t)}{dt^2} = f_i(t) + \xi_i(t), \quad (3.17)$$

де $x_i(t)$ – позиція агента i в момент часу t , $f_i(t)$ – сила, що діє на агента i з боку оточення, m_i – маса i останній член, $\xi_i(t)$, – невелике випадкове коливання сили.

Швидкість агента i визначається як $v_i(t) = dx_i/dt$.

Вплив сили на агента, що складається з багатьох компонентів:

$$f_i = \frac{m_i}{\tau_i} (v_i^0 - v_i) + \sum_{j \neq i} (f_{ij}^{soc} + f_{ij}^c + f_{ij}^{att}) + \sum_{\omega} (f_{i\omega}^{soc} + f_{i\omega}^c) + \sum_k f_{ik}^{att}, \quad (3.18)$$

де перша сума описує взаємодію агент-агент, сума над ω відображає взаємодію агент-стіна, а елементи в останній сумі, f_{ik}^{att} , можуть бути використані для інших взаємодій агент-середовище, таких як евакуація агента від джерела пожежі. Перший член у правій частині описує рушійну силу агента, який евакуюється. Кожен агент намагається йти з певною швидкістю, до виходу або іншої цілі, де τ_i встановлюється рівним $v_i^0 = |v_i^0|$, де v_i^0 – це власна швидкість руху. Параметр часу напрямку визначається напрямком поля v силою рушійної сили, що змушує агента прискорюватися до бажаної швидкості руху.

Сила взаємодії між агентами у рівнянні (3.18) складається з трьох частин.

$$f_{ij}^{soc} = A_i e^{-(d_{ij}-r_{ij})/B_i} (\lambda_i + (1 - \lambda_i) \frac{1+\cos \varphi_{ij}}{2}) n_{ij}, \quad (3.19)$$

де d_{ij} - відстань між центрами колів, що описують агентів, r_{ij} - сума радіусів колів, а вектор n_{ij} - одиничний вектор, що вказує від агента j до агента i . Для трикологового представлення агентів (рис. 3.25), кола, використовуються в рівнянні (3.19) – ті кола двох агентів, які найближче один до одного. Кут φ_{ij} - це кут між напрямком руху агента i , який відчуває силу, та напрямком до агента j , який чинить силу відштовхування на агента i . Параметри A_i та B_i описують силу та просторову величину сили відповідно. Параметр λ_i контролює анізотропію соціальної сили. Якщо $\lambda_i = 1$, то сила симетрична, а якщо $0 < \lambda_i < 1$, сила попереду агента більша, ніж позаду. Психологічна взаємодія стіна-агент, f_{soc} , розглядається аналогічно, але значення A_w , B_w і λ_w використовуються для сили константи.

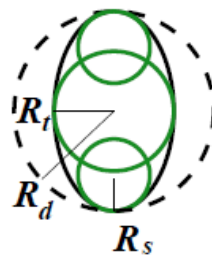


Рисунок 3.25 – Форма людського тіла приблизно зображена комбінацією трьох кіл, які перекриваються із визначенням змінних розміру тіла [89]

Силу фізичного контакту між агентами, f_{ij}^{soc} задано:

$$f_{ij}^c = (k_{ij}(r_{ij} - d_{ij}) + c_d \Delta v_{ij}^n) n_{ij} + \kappa_{ij}(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ij}^t t_{ij}, \quad (3.20)$$

де Δv_{ij}^t – різниця дотичних швидкостей коліс, що контактують; Δv_{ij}^n – різниця їх нормальних швидкостей; вектор t_{ij} – одиничний тангенціальний вектор контактуючих кіл. Ця сила діє лише тоді, коли кола знаходяться в контакті, тобто.

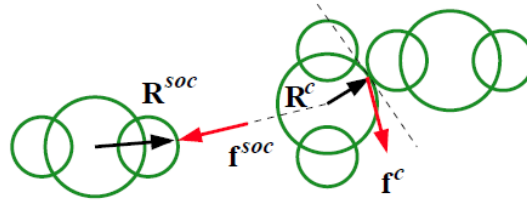


Рисунок 3.26 – Визначення радіальних векторів R^c і R^{soc} [89]

$r_{ij} = d_{ij} - 0$. Сила радіальної пружної сили визначається константою сили k_{ij} , а сила тертя - константою сили κ_{ij} . Звернемо увагу, що рівняння (3.20) містить також фізичну силу демпфування з параметром демпфування c_d , який було додано Ленгстоном та іншими. Оригінальна модель Хельбінга та інших не мала цієї сили. Цей параметр відображає той факт, що зіткнення двох людей не є пружним. Взаємодія фізичної стіни та агента, f_{iw}^c , обробляється аналогічно, і використовуються однакові константи сили.

Усі члени сили в рівнянні (3.18) мають відносно малий радіус дії, їм потрібне з'єднання прямої видимості. Сили більшого діапазону можуть бути враховані шляхом зміни бажаного поля швидкості ходьби v_i^0 агентів.

Рівняння (3.17) – (3.20) описують поступальну ступінь свободи евакууючих агентів. Обертальну ступінь свободи розглядають аналогічно, тобто кожен агент має своє власне обертальне рівняння руху.

$$I_i^z \frac{d^2 \varphi_i(t)}{dt^2} = M_i^z(t) + \eta_i^z(t), \quad (3.21)$$

де $\varphi_i(t)$ – кут, під яким знаходиться агент i у момент часу t , I_i^z – момент інерції, $\eta_i^z(t)$ є невеликою випадковою флуктуацією, а загальний момент обертання, який діє на агента через $M_i^z(t)$, враховує округлення.

$$M_i^z(t) = M_i^c(t) + M_i^{soc}(t) + M_i^r(t), \quad (3.22)$$

де M_i^c , M_i^{soc} , та M_i^r – моменти контактної, соціальної та рухової сил відповідно.

Крутний момент контактних сил розраховується як

$$M_i^c = \sum_{j \neq i} (R_i^c \times f_{ij}^c), \quad (3.33)$$

де R_i^c – радіальний вектор, який вказує від центру агента i до точки контакту, (рис. 3.26).

Також діють соціальні сили на агентів, вони визначаються формулою

$$M_i^{soc} = \sum_{j \neq i} (R_i^{soc} \times f_{ij}^{soc}), \quad (3.34)$$

де розглядаються лише ті кола, які розташовані найближче одне до одного. Вектор R_i^{soc} вказує від центру агента i до фіктивної точки контакту соціальної сили, рис. 3.25.

Аналогічно до рухової сили, перший член у правій частині рівняння (3.18), мотиваційний крутний момент визначається як

$$M_i^r(t) = \frac{I_i^z}{\tau_i^z} \left(\frac{\varphi_i(t) - \varphi_i^0}{\pi} \omega^0 - \omega_i(t) \right) = \frac{I_i^z}{\tau_i^z} (\tilde{\omega}_i^0(t) - \omega_i(t)). \quad (3.35)$$

де ω^0 – максимальна цільова кутова швидкість поворотного агента, $\omega_i(t) = d\varphi_i/dt$ – цільовий кут, кутова швидкість агента i , $\varphi_i(t)$ – поточний кут тіла, та φ_i^0 – цільовий кут, тобто, де вектор v_i^0 , визначений у рівнянні (9), вказує, що цільова кутова швидкість $\tilde{\omega}_i^0$ більше, коли кут тіла сильно відрізняється від бажаного напрямку руху. Ленгстон та ін. [89] використовували іншу формулу для рушійного моменту, яка мала вигляд пружинну силу.

В моделі агенти рухаються до виходів у вказаному напрямку, що представляє собою векторне поле, v_i^0 . Це векторне поле виникає як приблизне рішення задачі потоку двовимірної нестислої рідини за заданими граничними умовами, де стінки є непроникними, а вибрані виходи діють як свого роду вентилятор, що витягує рідину з області. Цей підхід, а точніше, цей трюк, створює ефективне поле напрямку для виходу до вибраних вихідних дверей (рис. 3.27).

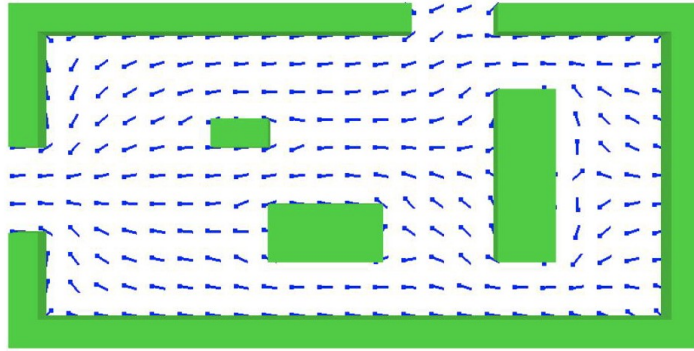


Рисунок 3.27 – Приклад двовимірних полів потоку, які використовуються для направлення агентів до виходу [91]

Метод руху агента, представлений у рівняннях (3.17)–(3.35), має багато параметрів. Деякі з цих параметрів пов'язані з фізичними розмірами людини, наприклад, m_i та I_i^z , але багато параметрів пов'язані з обраною моделлю. Деякі з цих параметрів вибрані такими, як у літературі [86, 89], а деякі оцінені з тестових розрахунків. Параметри соціальної сили обрані таким чином, щоб специфічні потоки через двері та коридори були відповідними. Параметри контактних сил та оберտальних ступенів свободи для трьохкологового представлення агентів обрані відповідно до основного методу щоб отримати досить реалістичний рух. Моделювання проведено методом Монте-Карло, щоб побачити, які параметри моделі є найважливішими, і подальший аналіз був зосереджений на цих параметрах.

Маса агента чоловічої статі за замовчуванням приймається $m_i = 80$ кг, а його момент інерції приймається $I_z^i = 4,0$ кг·м². Для інших агентів маса та момент інерції отримані шляхом масштабування. Для параметра часу кутової релаксації τ_z використовується значення 0,2 с. Кутовий параметр швидкості ω^0 має значення 4π s⁻¹, тобто два оберти в секунду. Випадкова сила в рівнянні (3.17) приймається як усереднений гауссів з середнім значенням нуль та стандартним відхиленням $\xi_i/m_i = 0,1$ м/с², і її скорочують утричі від стандартного відхилення. Випадковий крутний момент у рівнянні (3.21) розглядається аналогічно, і його стандартне відхилення $\eta_i^z / I_i^z = 0,1$ с⁻².

Вмоделі враховуються розміри тіла, швидкість руху та параметри рушійної сили τ_i шляхом їхнього вибору з випадкових розподілів. Рівномірний розподіл в діапазоні від 0,8 с до 1,2 с використовується для τ_i , а рівномірні розподіли для розмірів тіла та для швидкості безперешкодного руху наведені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6

Швидкість безперешкодного руху та розміри тіла

Тип	R_d (м)	R_t / R_d (-)	R_s / R_d (-)	D_s / R_d (-)	Швидкість
Дорослий	$0,255 \pm 0,035$	0,5882	0,3725	0,6275	$1,25 \pm 0,30$
Чоловік	$0,270 \pm 0,020$	0,5926	0,3704	0,6296	$1,35 \pm 0,20$
Жінка	$0,240 \pm 0,020$	0,5833	0,3750	0,6250	$1,15 \pm 0,20$
Дитина	$0,210 \pm 0,015$	0,5714	0,3333	0,6667	$0,90 \pm 0,30$
Люди похилого віку	$0,250 \pm 0,020$	0,6000	0,3600	0,6400	$0,80 \pm 0,30$

Примітка: Зміщення плечових колін задано як $d_s = R_d - R_s$. Для визначення інших змінних розміру тіла, R_d , R_t , R_s , рис. 3.24. Розміри тіла та швидкість ходи агентів персоналізовані, використовуючи їх із рівномірних розподілів.

Для уникнення зіткнень з відновленням потоку використовується модель зустрічного потоку [94]. У моделі зустрічного потоку область перед агентом i ділиться на три сектори, що перекриваються, $S_i^\theta = \{S_i^{-\theta}, S_i^0, S_i^{+\theta}\}$, які спрямовані ліворуч $u_i^{-\theta}$, прямо u_i^0 та праворуч $u_i^{+\theta}$ (рис. 3.28). «Прямо» завжди означає бажаний напрямок, v_0^i в (2), де агент рухається без впливу моделі зустрічного потоку, наприклад, у напрямку до дверей. Основна ідея моделі зустрічного потоку полягає в виборі сектора з найменшим зустрічним потоком. Це формулюється як задача оптимізації, де кожен агент, який знаходиться у секторі, або збільшує, або зменшує оцінку сектора залежно від його розташування та швидкості руху. Якщо передній сектор агента i не порожній, він обирає напрямок руху u_i^* з найвищою оцінкою серед напрямків секторів, $U_i^\theta = \{u_i^{-\theta}, u_i^0, u_i^{+\theta}\}$, десять разів за кожну секунду, у середньому. Агент i максимізує наступний вираз:

$$u_i^* = \arg \max_{u_i^\theta \in U_i^\theta} \left\{ \sum_{j \in S_{i,\uparrow}^\theta} \frac{c_{df} + d_{df} \langle v_j - v_i, u_i^0 \rangle}{\max(0,2, D_{ij})} - \sum_{j \in S_{i,\downarrow}^\theta} \frac{c_{cf} - d_{cf} \langle v_j, u_i^0 \rangle}{\max(0,2, D_{ij})} + c_{v0} (\delta_{\theta>0} - \delta_{\theta<0}) + |c_{v0}| v_i \delta_{\theta=0} + N_0 (c_{ncf} + d_{v0} v_i) \delta_{\theta=0} \delta_{N_0^{cf} = 0} \right\}, \quad (3.36)$$

де $u_i^0 = \frac{v_i^0}{|v_i^0|}$ - це початковий напрямок до дверей в які прямує агент i . D_{ij} - це відстань між агентами j та i , а v_j та v_i - їх швидкості. Дужки виражають внутрішні добутки аргументів, а c_{df} , d_{df} , c_{cf} та d_{cf} - константи. Максимуми у знаменниках використовуються для уникнення ділення на нуль. Агенти всередині секторів S_i^θ поділяються на агентів зустрічного потоку ($\downarrow\uparrow$) та не контрпотоку ($\uparrow\uparrow$), прогнозуючи їх бажаний напрямок руху, u_i^0 , вздовж бажаного напрямку руху поточного агента, u_i^0 . Символ $\delta_{\theta>0}$ дорівнює одиниці, якщо $\theta > 0$ і нулю в іншому випадку, так само і для інших.

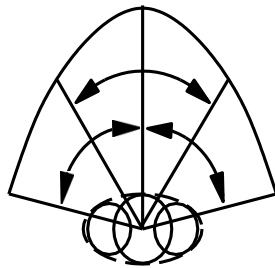


Рисунок 3.28 – Визначення секторів, що використовуються в моделі уникнення короткодійної колізії (зустрічного потоку)

У вищезазначеній задачі максимізації є члени, які віддають перевагу правому, прямому або лівому напрямкам, щоб створити спостережуваний правосторонній рух [95]. Правий (лівий) сектор отримує додаткову вагу c_{v0} ($-c_{v0}$), а передній сектор отримує вагу $|v_i^0|v_i$. Звернемо увагу, що, задавши від'ємне значення параметру c_{v0} , можна віддати перевагу лівому напрямку правому. Якщо в передньому секторі відсутні агенти зустрічного потоку, $N_0^{cf} = 0$, тоді цей сектор вибирається за допомогою члена $N_0(c_{ncf} + d_{v_0}v_i)$, де c_{ncf} і v_i - це константи, а N_0 - кількість агентів у передньому секторі. Без цього члена агенти можуть почати рухатися вбік навколо кінця черги біля дверей, що не є реалістичним.

Рівняння (3.36) описує уникнення агентів зустрічного потоку у відсутності стін. Якщо сектор торкається стіни, то додатково призначаються деякі відносно

великі від'ємні ваги для цього сектора за допомогою параметрів c_{1w} та c_{2w} . Перший параметр використовується для надання негативної ваги, яка залежить від швидкості агента та відстані до стіни, виміряної вздовж напрямку сектора, u_i^θ . Сектори зі стінами ускладнюють ситуацію, коли агент рухається швидше, і чим ближче стіна, тим більше негативної ваги отримує цей сектор. Другий параметр використовується для надання великої негативної ваги для сектора, який переважно або повністю знаходиться всередині стіни, тобто агент вже майже впритул до цієї стіни.

Параметри соціальної сили A_i , A_w , B_i , а також параметри мотиваційної сили τ_i та τ_i^z і в рівняннях (3.18), (3.19) та (3.35) змінюються, коли агент зіткнувся зі сильним зустрічним потоком і його швидкість нижча, як це зазвичай буває у таких ситуаціях. Сила соціальної сили зменшується множителем $a_{min,cf}$ ($a_{w,cf}$ для стін) у максимальному обсязі, а діапазон соціальної сили зменшується множителем $b_{min,cf}$ у максимальному обсязі. Це дозволяє вищу щільність для ситуацій з протишкірним потоком. Зменшення соціальної сили агент-стіна враховує поведінку, коли людина готова підходити ближче до стін, обходячи інших людей. Перекладений і вихідний кут тілесних мотивацій також змінюється так, що агент намагається рухатися плечима вперед. Подібне обертання кута тіла відбувається, якщо агент знаходиться близько до стіни і йому стає складніше рухатися вперед.

Представлена модель зустрічного потоку призначена для щільних потоків агентів, тому межі секторів не є дуже великими. Максимальний діапазон секторів розтягується на три метри вперед від агента, а з боків сектори простягаються до 1,5 м. Якщо швидкість агента низька, то максимальний діапазон прямо наперед наближається до 1,5 метра, а сектори утворюють півколо, оскільки кут секторів, θ , збільшується від 40° до 45° , коли швидкість наближається до нуля. Початок секторів, точка P на рис. 5, знаходиться трохи перед окружністю тулуба, якщо агент рухається вільно, і постійно переміщується трохи за окружністю тулуба, коли швидкість руху наближається до нуля. Цей зсув становить як $\pm R_d$, (таблиця 3.6). Важливо включити агентів з боків в задачу оптимізації, коли

швидкість низька. Коли швидкість агента зростає, він більше дивиться вперед, і агенти з боків вважаються вже за ним, тобто рахуються обігнаними.

3.4.2 Моделювання експериментальних досліджень евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності за допомогою програмного забезпечення

Експерименти в сфері евакуації, поєднані з комп'ютерним моделюванням, виявляються ключовим інструментом для розуміння, аналізу та удосконалення стратегій евакуації в надзвичайних обставинах.

Використання комп'ютерних моделей дозволяє реалістично відтворювати різні сценарії евакуації людей в разі виникнення надзвичайних ситуацій, починаючи від пожеж і землетрусів до терористичних актів або небезпек військового характеру, і допомагає більш детально спрогнозувати евакуацію людей в різних ситуаціях. Це сприяє розробленню ефективних та безпечних стратегій евакуації, враховуючи психологічні аспекти, поведінку та потреби людей у таких ситуаціях.

Віртуальні експерименти також сприяють підвищенню підготовки персоналу та відвідувачів до надзвичайних ситуацій. Учасники мають можливість тренувати свої навички та знання щодо правильної поведінки під час евакуації, що підвищує загальний рівень безпеки.

Метою проведеного дослідження є вивчення та розкриття аспектів евакуації змішаних груп людей різної мобільності (M1, M2, M3, M4) в умовах пожежі. Основною ціллю є отримання більшої кількості даних для порівняння результатів моделювання з результатами реальних експериментів [96, 97], що дозволить переконатися в надійності отриманих прогнозів та можливості їх подальшого використання в науковій роботі.

Комп'ютерне моделювання оцінює адекватність даних про параметри руху людей під час евакуації при пожежі. Отримані дані відтворюють взаємозв'язки між швидкістю руху і щільністю потоку, що використовуються для розрахунку

тривалості евакуації та створення теплових карт щільності людського потоку. Це також дозволяє визначити тривалість затримок і скупчень, а також середню швидкість руху. Моделювання заповнює прогалини в даних, підвищуючи точність і надійність наукових висновків. Використано програмне забезпечення з індивідуально-потоковою моделлю руху та інструментами для 2D і 3D-візуалізації результатів.

Середовище руху людей являє собою тривимірну трикутну сітку, що збігається з реальними розмірами моделі будівлі. Сітка автоматично генерована на основі імпортованих даних геометрії FDS, створеної на основі креслень частини будівлі, де проводився експеримент.

Стіни та інші непрохідні ділянки подаються як розриви в навігаційній сітці. Такі об'єкти не моделюються в програмі безпосередньо, вони виражені неявно, оскільки люди не можуть рухатися там, де немає навігаційної сітки.

Для кожного агента (людини в моделі) визначено місце розташування, профіль (задано розміри, швидкість тощо) і поведінку (мета агента), яка дає змогу створювати сценарії. Агент моделюється як вертикальний циліндр, що рухається по сітці, використовуючи так званий інверсний керований рух. Рух кожного агента розраховується незалежно.

Перед початком моделювання процесу евакуації задається схема евакуаційних шляхів. Всі евакуаційні шляхи поділяються на евакуаційні ділянки довжиною a та шириною b . Довжина та ширина кожної ділянки шляху евакуації приймалась за фактичним значенням.

Під час розрахунку за габарити людини бралась її площа горизонтальної проекції. Задавалися координати кожної людини x_i – відстань від центра проекції до кінця евакуаційної ділянки, на якій вона перебуває (рис. 2.1).

Координати кожної людини x_i у початковий момент часу задавався відповідно до схеми розміщення людей у приміщенні.

Моделювання було здійснене відповідно до [84, 50]. Для порівняння та оцінки адекватності розрахованих моделей було проведено моделювання експериментальних досліджень змішаних людських потоків, що включали різні

відсоткові співвідношення людей різних груп мобільності, таких як M1, M2, M3 та M4 [97].

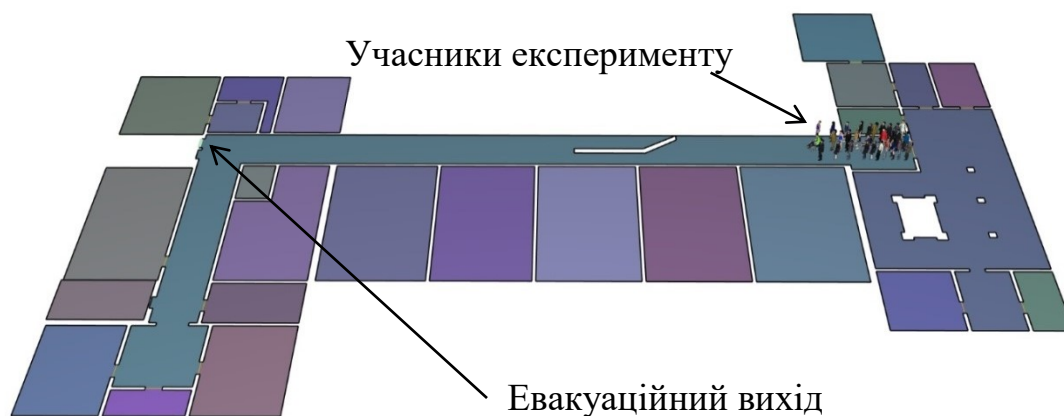
У процесі моделювання сценарію евакуації з участю різних груп людей з вадами зору (M2) учасники були об'єднані в єдиний потік, загальна кількість якого становила 40 агентів. Відсоткове співвідношення кількості агентів групи M2 у цьому потоці змінювалося від 2,5 % до 10 % від загальної кількості учасників.

Моделювання експериментальних досліджень евакуації змішаного потоку людей з наявністю в ньому осіб різних груп мобільності M1, M3 та M4 складається з двох блоків. В першому блоці моделювання вихідні дані беруться згідно з [5]. Другий блок моделей побудовано на основі емпіричних даних, отриманих під час проведення натурного експерименту дослідження евакуації змішаного потоку людей з наявністю в ньому осіб різних груп мобільності.

У межах кожної серії моделювання дослідів, всі учасники об'єднувалися в один потік, загальна кількість якого становила 30 агентів. Відсоткове співвідношення кількості агентів у групах M3 і M4 змінювалося від 3,33 % до 10 % від загальної кількості учасників у групі. Співвідношення були вибрані відповідно до проведеного експерименту та [84] (рис. 3.29).



а)



б)

Рисунок 3.29 – Розрахункова модель експериментальної ділянки евакуаційного шляху: а) – розрахункова модель на основі імпортованих даних геометрії FDS; б) – розрахункова модель Pathfinder

Прийнято, що місце виникнення умовної пожежі знаходиться на площі поверху, де пожежа може бути виявлена одночасно всіма агентами відповідно до [5, 84], а значення часу початку евакуації приймається рівним нулю.

Довжина змодельованої експериментальної ділянки становить 49,91 м, ширина – 3,07 м.

Потік учасників рухається до відносно безпечної зони, що вважається такою з моменту проходження людини через евакуаційний вихід (рис. 2 б). На шляху руху змодельовано штучний бар'єр, який на певному відрізку евакуаційного маршруту завдовжки 5 метрів обмежує ширину коридору до 1,2 м.

Візуалізацію моделювання експериментальних досліджень евакуації змішаного потоку агентів різних груп мобільності у часовій залежності (секундах), а також щільності потоку протягом всього часу пересування у відносно безпечну зону наведено на рис. 3.30–3.33.

Вихідні дані для проведення розрахунків бралися згідно з [5] та даних, отриманих під час проведення натурного експерименту дослідження евакуації змішаного потоку людей з наявністю в ньому осіб різних груп мобільності M1, M2, M3 та M4.

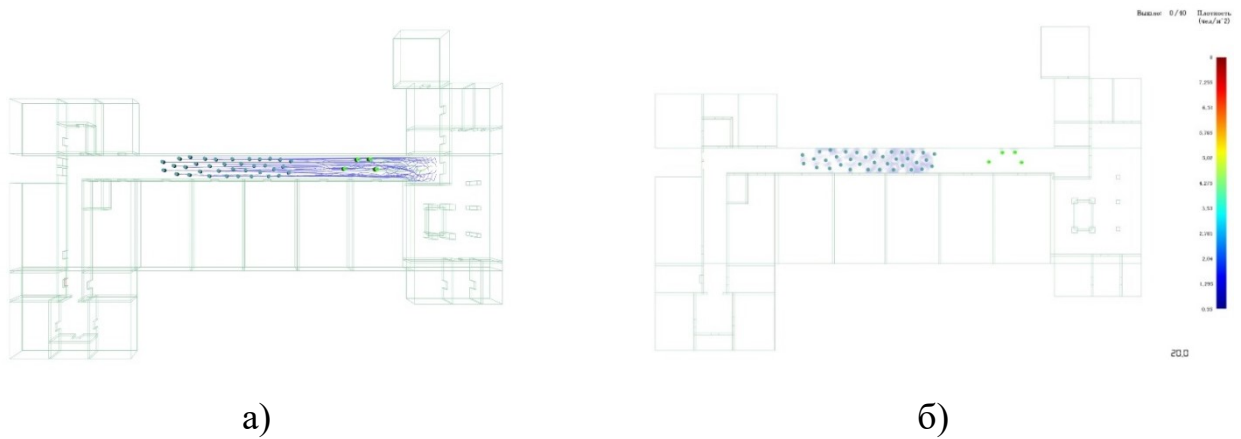


Рисунок 3.30 – Візуалізація результатів моделювання руху потоку до складу якого входять агенти груп мобільності M1 та M2: а) – слідування агентів груп мобільності M1 та M2; б) – щільність агентів груп мобільності M1 та M2 на ділянці евакуаційного шляху

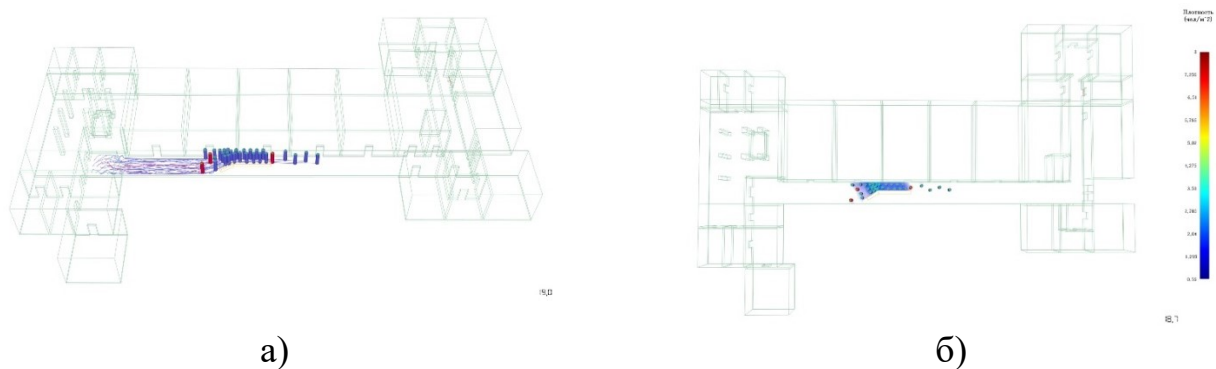


Рисунок 3.31 – Візуалізація результатів моделювання потоку до складу якого входять агенти груп мобільності M1 та M3: а) – слідування агентів груп мобільності M1 та M3; б) – щільність агентів груп мобільності M1 та M3 на ділянці евакуаційного шляху

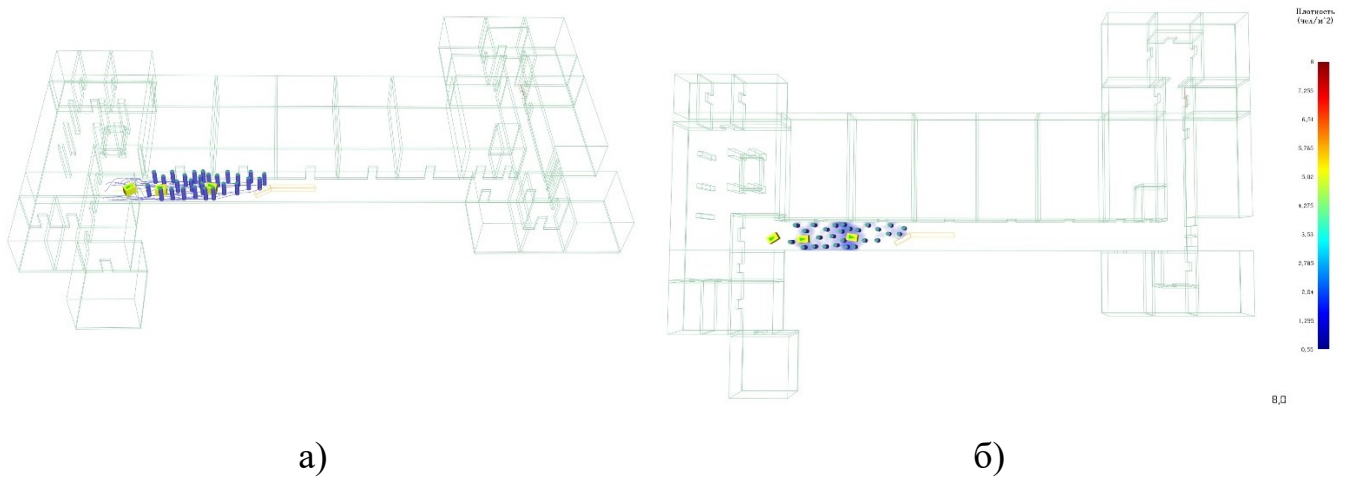


Рисунок 3.32 – Візуалізація результатів моделювання руху потоку до складу якого входять агенти груп мобільності M1 та M4: а) – слідування агентів груп мобільності M1 та M4; б) – щільність агентів груп мобільності M1 та M4 на ділянці евакуаційного шляху

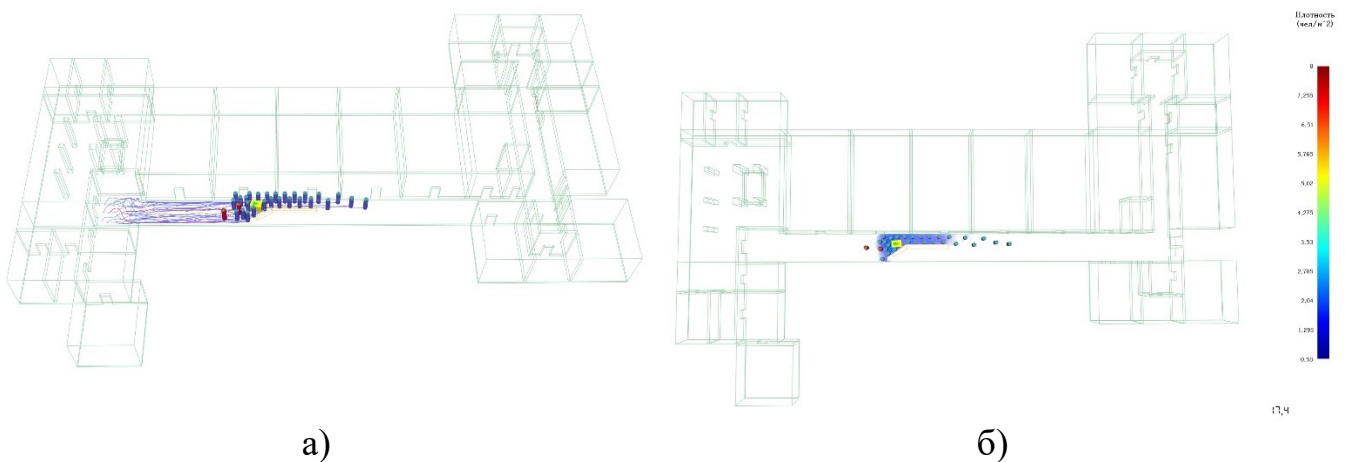


Рисунок 3.33 – Візуалізація результатів моделювання руху потоку до складу якого входять агенти груп мобільності M1, M3 та M4: а) – слідування агентів груп мобільності M1, M3 та M4; б) – щільність агентів груп мобільності M1, M3 та M4 на ділянці евакуаційного шляху

У додатку Д наведено динаміку виходу та швидкість потоку агентів крізь евакуаційний вихід (рис. Д.1–Д.10).

В таблиці 3.7 наведено швидкості людей різних груп мобільності, які використовувалися як вихідні дані під час проведення моделювання відповідно до [5] та даних натурного експерименту. В таблиці 3.8 наведено пропускну здатність евакуаційного виходу в моделях. Розшифровані результати моделювання наведено в додатку Г.

Таблиця 3.7

Швидкості груп мобільності використані під час моделювання натурного експерименту

№ досліду	Відсоткове співвідношення агентів в досліді	Моделювання згідно з вихідними даними ДСТУ 8828:2019			Моделювання з використанням даних, отриманих під час експерименту		
		$V_{сер} (M1)$ (м/с)	$V_{сер} (M3)$ (м/с)	$V_{сер} (M4)$ (м/с)	$V_{сер} (M1)$ (м/с)	$V_{сер} (M3)$ (м/с)	$V_{сер} (M4)$ (м/с)
1.	M1 (30) 100 %	1,67	-	-	1,85	-	-
2.	M1 (29) 96,67 % + M3 (1) 3,33 %	1,67	1,17	-	1,6	1,51	-
3.	M1 (28) 93,33 % + M3 (2) 6,67 %	1,67	1,17	-	1,43	1,33	-
4.	M1 (27) 90 % + M3 (3) 10 %	1,67	1,17	-	1,37	1,39	-
5.	M1 (29) 96,67 % + M4 (1) 3,33 %	1,67	-	1	1,21	-	1,12
6.	M1 (28) 93,33 % + M4 (2) 6,67 %	1,67	-	1	1,43	-	1,33
7.	M1 (27) 90 % + M4 (3) 10 %	1,67	-	1	1,47	-	1,4
8.	M1 (27) 90 % + M3 (1) 3,33% + M4 (2) 6,67 %	1,67	1,17	1	1,35	1,29	1,63
9.	M1 (27) 90 % + M3 (2) 6,67 % + M4 (1) 3,33 %	1,67	1,17	1	1,56	1,31	1,65
10.	M1 (28) 93,33 % + M3 (1) 3,335 % + M4 (1) 3,335 %	1,67	1,17	1	1,42	1,17	1,5

Таблиця 3.8

Пропускна здатність евакуаційного виходу

№ досліду	Відсоткове співвідношення агентів в досліді (кількість агентів)	Кількість агентів, що використали, (люд)	Моделювання згідно з вихідними даними ДСТУ 8828:2019			Моделювання з використанням даних отриманих під час експерименту		
			Увійшов перший агент, (с)	Увійшов останній агент, (с)	Середній потік, (люд/с)	Увійшов перший агент, (с)	Увійшов останній агент, (с)	Середній потік, (люд/с)
1.	M1 (30) 100 %	30	27,9	49,7	1,38	25,4	44	1,61
2.	M1 (29) 96,67 %+ M3 (1) 3,33 %	30	27,9	51,3	1,28	29,1	50,6	1,39
3.	M1 (28) 93,33 % + M3 (2) 6,67 %	30	27,9	54,3	1,13	32,4	57	1,22
4.	M1 (27) 90 % + M3 (3) 10 %	30	27,9	55,3	1,09	33,8	59,8	1,16
5.	M1 (29) 96,67 % + M4 (1) 3,33 %	30	27,9	57,9	1	38,2	68,5	0,99
6.	M1 (28) 93,33 % + M4 (2) 6,67 %	30	27,9	62,3	0,87	32,5	65,2	0,92
7.	M1 (27) 90 % + M4 (3) 10 %	30	26,4	69,1	0,7	29,9	65,1	0,85
8.	M1 (27) 90 % + M3 (1) 3,33% + M4 (2) 6,67 %	30	27	63,3	0,83	33,2	72,1	0,77
9.	M1 (27) 90 % + M3 (2) 6,67 % + M4 (1) 3,33 %	30	27,9	60,7	0,91	29,8	57,5	1,08
10.	M1 (28) 93,33 % + M3 (1) 3,335 % + M4 (1) 3,335 %	30	27,9	59,8	0,94	32,6	61,9	1,03

3.5 Обґрунтування поправочних коефіцієнтів впливу щільності та відсоткового співвідношення людей маломобільних груп на швидкість людського потоку

Отримані результати моделювання та дані графічних зображень підтверджують отримані дані експериментальних досліджень щодо наявності впливу щільності та відсоткового співвідношення людей маломобільних груп на швидкість людського потоку під час евакуації.

Такий вплив описується коефіцієнтами. Для визначення коефіцієнтів впливу щільності та частки маломобільних груп на швидкість людського потоку

проведено обчислювальний експеримент. В якості критеріїв, які істотно впливають на швидкість потоку під час евакуації у разі пожежі, обрано: щільність потоку, різне відсоткове співвідношення людей груп мобільності M1 та M3, різне відсоткове співвідношення людей груп мобільності M1 та M4, різне відсоткове співвідношення людей груп мобільності M1, M3 та M4.

В таблиці 3.9 наведено час виходу агентів, отриманий в процесі моделювання, порівняно з часом виходу агентів, що отриманий внаслідок проведення експериментальних досліджень евакуації людей різних груп мобільності (M1, M3, M4).

Таблиця 3.9

Час виходу агентів у відносно безпечну зону

№ досліджу	Відсоткове співвідношення агентів в досліді	$t_{\text{вих}}, (\text{с})$			Різниця результатів моделювання та експерименту, (%)		Різниця результатів моделювання, (%)
		Моделювання згідно з ДСТУ8828:2019	Моделювання з використанням даних, отриманих під час експерименту	Результати експерименту	Моделювання згідно з ДСТУ8828:2019	Моделювання з використанням даних, отриманих під час експерименту	
1.	M1 (30) 100%	49,7	44	36,75	26,05	16,48	11,47
2.	M1 (29) 96,67 % + M3 (1) 3,33 %	51,3	50,6	49,72	3,08	1,74	1,36
3.	M1 (28) 93,33 % + M3 (2) 6,67 %	54,3	57	50,36	7,26	11,64	4,74
4.	M1 (27) 90 % + M3 (3) 10 %	55,3	59,8	55,12	0,33	7,81	7,52
5.	M1 (29) 96,67 % + M4 (1) 3,33 %	57,9	68,5	51,61	10,86	24,65	15,47
6.	M1 (28) 93,33 % + M4 (2) 6,67 %	62,3	65,2	59,03	5,25	9,47	4,45
7.	M1 (27) 90 % + M4 (3) 10 %	69,1	65,1	62,58	9,44	3,87	5,79
8.	M1 (27) 90 % + M3 (1) 3,33% + M4 (2) 6,67 %	63,3	72,1	55,21	12,78	23,43	12,19
9.	M1 (27) 90 % + M3 (2) 6,67 % + M4 (1) 3,33 %	60,7	57,5	51,62	14,95	10,23	5,28
10.	M1 (28) 93,33 % + M3 (1) 3,335 % + M4 (1) 3,335 %	59,8	61,9	56,94	4,78	8,01	3,4

Процес евакуації змішаного людського потоку, що включає учасників груп мобільності М1, М3, М4 під час евакуації, що є об'єктом дослідження, залежить не від одного, а від кількох факторів, а саме вплив щільності потоку, відсоткового співвідношення маломобільних осіб та інших змінних, які можуть суттєво вплинути на процес евакуації. Їх вплив можна виразити за допомогою статистичних методів.

Результати експериментів та комп'ютерного моделювання створюють передумови для застосування багатфакторних моделей з метою встановлення взаємозв'язків між результативною ознакою та основними факторами.

З метою дослідження якісної та кількісної оцінки внутрішніх та зовнішніх взаємозв'язків між результативною ознакою та обраними факторами доцільно застосовувати регресійний аналіз. Основне завдання цього методу полягає в аналізі наявних статистичних даних щодо досліджуваних ознак і подальшому визначенні взаємозв'язку шляхом розрахунку коефіцієнтів залежностей.

Взаємодія результуючого показника (Y) з факторними ознаками ($x_1, x_2, \dots, x_n$) традиційно описується рівнянням лінійної багатфакторної регресії, яке визначається за формулою (3.37) [99, 100, 101]. Для подальшого аналізу отриманих даних було використано регресійну залежність, яка має такий вигляд рівняння:

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_1x_2 + a_5x_1x_3 + a_6x_2x_3 + a_7x_1x_2x_3 \quad (3.37)$$

У якості результуючого показника (Y) було прийнято середню швидкість змішаного людського потоку під час евакуації, м/хв, а у якості факторних величин наступні показники: де x_1 – середня щільність потоку, $\text{м}^2/\text{м}^2$; x_2 – відсоток осіб групи мобільності М3 в потоці, %; x_3 – відсоток осіб групи мобільності М4 в потоці, %.

Зведені дані для регресійного аналізу впливу факторних величин на середню швидкість змішаного людського потоку під час евакуації наведено в Додатку Е.

З метою отримання загального уявлення про дані проводилася описова статистика таблиця 3.10. Вона допомагає зрозуміти основні характеристики набору даних, такі як середнє значення, медіана, дисперсія, стандартне

відхилення тощо. Цей етап є підготовчим перед проведенням більш складних статистичних аналізів, таких як кореляційно-регресійний аналіз.

Таблиця 3.10

Описова статистика експериментальних даних

Значення	$D_{сер}$	M3	M4	$V_{сер}$
мін	0,04	0,00	0,00	14,05
сер	0,40	3,24	3,38	45,90
макс	0,86	10,00	10,00	105,00
σ	0,20	3,26	3,34	17,91
медіана	0,39	3,33	3,33	44,67
асиметрія	0,23	0,63	0,59	0,52
Δx	0,205024367	2,5	2,5	22,7375

Дані показують різні рівні варіативності та розподілу для кожної змінної. Змінна Y ($V_{сер}$) має найвищі середнє значення, стандартне відхилення та інтервал, що вказує на більшу варіативність у порівнянні з іншими змінними. Змінні x_2 (M3) та x_3 (M4) мають подібні характеристики розподілу, тоді як змінна x_1 ($D_{сер}$) має найнижчі значення середнього, стандартного відхилення та інтервалу, що вказує на більш концентровані дані навколо середнього значення.

Для аналізу та інтерпретації розподілу даних, оцінки їх структури та характеристики використано розподіл інтервалів експериментальних даних наведений в таблиці 3.11, який здійснює порівняння між різними значеннями, виявляє викиди або несподівані варіації у даних, а також дозволяє зрозуміти центральні тенденції, розмах розподілу, виявлення шаблонів і залежностей в даних.

Таблиця 3.11

Розподіл інтервалів експериментальних даних

Межі інтервалу $D_{сер}$	Частоти інтервалу	Межі інтервалу M3	Частоти інтервалу	Межі інтервалу M4	Частоти інтервалу	Межі інтервалу $V_{сер}$	Частоти інтервалу у
0,25	107	2,50	167	2,50	162	36,79	143
0,45	140	5,00	130	5,00	128	59,53	175
0,66	113	7,50	81	7,50	82	82,26	83
0,86	55	10,00	37	10,00	43	105,00	14

Розподіл для $D_{\text{сер}}$ показує, що найбільша частота спостерігається в інтервалі 0,45, вказуючи на його високу представленість серед досліджуваних даних. Гістограми для М3 і М4 демонструють схожі розподіли, з високими частотами в інтервалах 2,50 і 5,00, що свідчить про концентрацію значень в нижніх діапазонах цих параметрів. $V_{\text{сер}}$, найвища частота спостерігається в інтервалі 59,53, що вказує на відмінність цього параметра від інших за розподілом значень.

Використовуючи дані параметрів змішаного людського потоку, за формулою (3.38) визначено константи рівняння регресійної залежності.

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i; a_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 y_i; a_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 y_i; a_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_3 y_i; \\ a_4 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 y_i; a_5 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_3 y_i; a_6 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 x_3 y_i; \\ a_7 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 x_3 y_i \end{aligned} \quad (3.38)$$

Таблиця 3.12

Константи рівняння числової регресійної залежності

Коефіцієнт	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
Значення	95,4713	-83,024	-2,7518	-4,6422	1,57626	3,63924	0,52949	-0,7463

За результатами проведених розрахунків побудовано прямі залежностей швидкості від щільності для різних складів евакуаційних потоків груп мобільності М1, М3 та М4 які мають наступний вигляд (рис. 3.34–3.36).

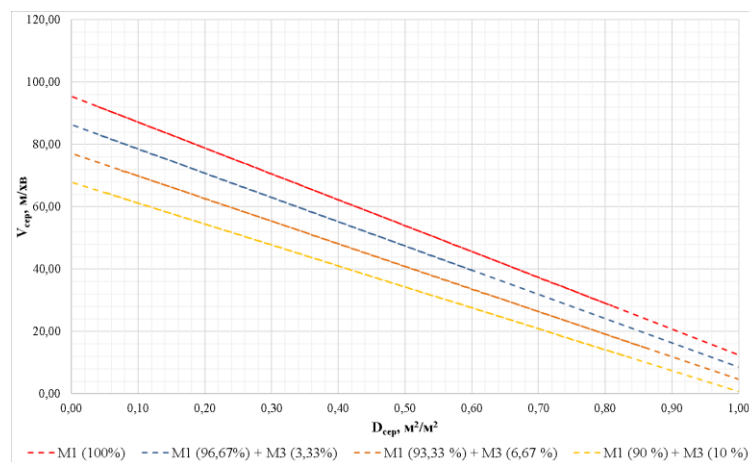


Рисунок 3.34 – Графік регресійних залежностей швидкості руху людських потоків від щільності до складу яких входять учасники груп мобільності М1 та М3

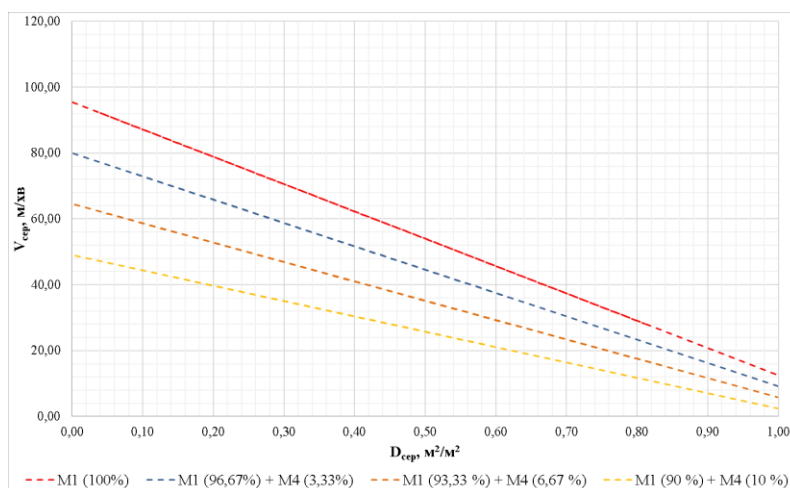


Рисунок 3.35 – Графік регресійних залежностей швидкості руху людських потоків від щільності до складу яких входять учасники груп мобільності M1 та M4

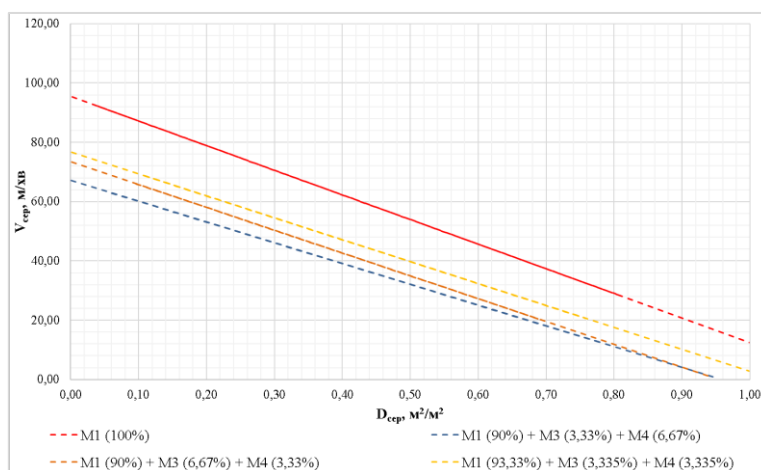


Рисунок 3.36 – Графік регресійних залежностей швидкості руху людських потоків від щільності до складу яких входять учасники груп мобільності M1, M3 та M4

Графіки регресійних залежностей швидкості руху людських потоків від щільності до складу яких входять учасники різних груп мобільності показують, як швидкість змішаного людського потоку змінюється в залежності від щільності цього потоку. Графіки побудовані на основі даних, отриманих в результаті регресійного аналізу, який дозволяє визначити математичну модель, що описує взаємозв'язок між швидкістю і щільністю потоку. Лінія регресії на графіку ілюструє середню тенденцію зміни швидкості в залежності від змін у щільності, а

також може бути використана для прогнозування швидкості при різних значеннях щільності людського потоку.

Таким чином встановлено залежність середньої швидкості змішаного людського потоку від щільності та відсоткового співвідношення учасників груп мобільності М1, М3 та М4. Дану залежність можна описати у вигляді множинної лінійної регресії, яка має вигляд:

$$V_{\text{сер}} = 95,47131679 - 83,02423075D_{\text{сер}} - 2,751822156\alpha_{\text{М3}} - 4,64221358\alpha_{\text{М4}} + \\ + 1,576260255D_{\text{сер}}\alpha_{\text{М3}} + 3,63924295D_{\text{сер}}\alpha_{\text{М4}} + 0,529491833\alpha_{\text{М3}}\alpha_{\text{М4}} - \\ - 0,746254255D_{\text{сер}}\alpha_{\text{М3}}\alpha_{\text{М4}}$$

де $V_{\text{сер}}$ – розрахункова середня швидкість потоку; $D_{\text{сер}}$ – середня щільність потоку; $\alpha_{\text{М3}}$ – частка учасників групи мобільності М3, %; $\alpha_{\text{М4}}$ – частка учасників групи мобільності М4, %.

Результати розрахунків виводимо у вигляді таблиць 3.13–3.15:

Таблиця 3.13

Регресійна статистика

Множинний R	0,950435245
R^2	0,903327155
Нормований R^2	0,901664477
Стандартна похибка	5,617717861
Спостереження	415

«Множинний R » – коефіцієнт множинної кореляції R , який визначає щільність зв'язку між залежними та незалежними змінними;

« R^2 » – коефіцієнт детермінації R^2 показує частку впливу комбінації незалежних змінних на залежну змінну (у відносних величинах, які можна перевести у відсотки множенням на 100%);

«Нормований R^2 » – скоригований (адаптований) коефіцієнт детермінації (3.39)

$$R_{adj}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-m-1} \quad (3.39)$$

де n – кількість спостережень; m – кількість пояснюючих змінних моделі. Враховує зв'язок кількості результатів спостережень і незалежних змінних та

забезпечує інформацією про те, яке значення R^2 можна отримати в значно більшому наборі даних, ніж аналізований;

«Стандартна похибка» – похибка моделі B_e , яка характеризує варіацію залишкових величин;

«Спостереження» – кількість спостережень n .

Проведемо аналіз якості моделі за допомогою розділу «Регресійна статистика».

З рядку «Множинний R » бачимо значення коефіцієнта парної кореляції $r_{y,x} = 0,950435245$, тобто його значення наближується до одиниці. Це означає, що між швидкістю змішаного людського потоку, щільністю та відсотковим співвідношенням учасників груп мобільності М1, М3 та М4 існує прямий та сильний кореляційний зв'язок.

З рядку « R^2 » виписуємо значення коефіцієнта детермінації $R^2 = 0,903327155$. Оскільки коефіцієнт детермінації дорівнює 0,903327155, то це означає, що теоретична пряма пояснює 90,33% варіації або можна сказати, що 90,33 % варіації швидкості потоку відбувається під впливом щільності та відсоткового співвідношення учасників груп мобільності М1, М3 та М4. А решта 9,67 % – припадає на інші фактори та випадкові величини. Що свідчить про високий рівень адекватності моделі в цілому.

Таблиця 3.14

Дисперсійний аналіз

	df	SS	MS	F	Значимість F
Регресія	7	120020,3321	17145,76173	543,2965366	$4,558 \cdot 10^{-202}$
Залишки	407	12844,41286	31,55875396	-	-
Загальне	414	132864,7449	-	-	-

У стовпці « df » (degrees of freedom) – кількість ступенів свободи:

в рядку «Регресія» для регресійної суми квадратів відхилень $df=m-1$;

в рядку «Залишки» для залишкової суми квадратів відхилень $df=n-m$;

в рядку «Загальне» для загальної суми квадратів відхилень $df=n-1$.

У стовпці « SS » (Sum of Squares) – сума квадратів (відхилень):

в рядку «Регресія» – регресійна сума квадратів відхилень (3.40)

$$S_Y = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2, \quad (3.40)$$

в рядку «Залишки» – залишкова сума квадратів відхилень (3.41)

$$S_e = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \quad (3.41)$$

в рядку «Загальне» – загальна сума квадратів відхилень (3.42)

$$S_y = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \quad (3.42)$$

У стовпці «*MS*» (Mean of Squares) – середні суми квадратів відхилень з урахуванням числа ступенів вільності (3.43):

$$MS = \frac{SS}{df}. \quad (3.43)$$

У стовпці «*F*» – розрахункове значення критерію Фішера з рівнем довіри 95 %;

У п'ятому стовпці наведено «Значимість *F*», яка показує, що при значенні цього показника менше 0,05 побудована регресійна модель відповідає реальній дійсності. Або це – теоретична ймовірність того, що при гіпотезі рівності нулю одночасно усіх коефіцієнтів моделі *F*-статистика є більшою емпіричного значення *F*. Якщо показник значущості *F* є меншим за 0,05, то отриманий результат є значимим; якщо значимість *F* менше 0,01, тоді отриманий результат є високо значимим.

Проведення аналізу якості моделі за допомогою «*F*»:

Для оцінки рівня адекватності побудованої економетричної моделі за експериментальними даними користуємося *F*-критерієм Фішера (3.44):

$$F = \frac{S_{\text{факт}}}{S_{\text{ост}}} = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{n-m-1}{m} \quad (3.44)$$

З комірки у стовпчику *F* приймаємо розрахункове значення *F*-критерію Фішера $F = 543,2965366$.

Для рівня значимості $\alpha=0,05$ і ступенів вільності $k_1=m-1$ та $k_2=n-m$ (де *n* – обсяг вибіркової сукупності або кількість спостережень, *m* – кількість параметрів моделі) визначаємо критичне (табличне) значення *F*-критерію Фішера.

$F_{\text{табл}} = 2,03$, отже виконується умова $F_{\text{розрах}} > F_{\text{табл}}$, оскільки $F_{\text{розрах}} > F_{\text{табл}}$, то робимо висновок про адекватність побудованої моделі за експериментальними даним.

Проведення аналізу якості моделі за допомогою «Значимість F »:

«Значимість F », яка показує, що при значенні цього показника менше 0,05 побудована регресійна модель відповідає реальній дійсності. Або це – теоретична ймовірність того, що при гіпотезі рівності нулю одночасно усіх коефіцієнтів моделі F -статистика є більшою емпіричного значення F . Якщо показник значущості F є меншим за 0,05, то отриманий результат є значимим; якщо значимість F менше 0,01, тоді отриманий результат є високо значимим. «Значимість F » = $4,558 \cdot 10^{-202}$ менший за 0,01, отже отримана модель є високо значимою статистично.

Таблиця 3.15

Регресійний аналіз

Незалежні змінні	Коефіцієнти	Стандартна похибка	<i>t</i> -статистика	<i>P</i> -Значення	Нижнє 95%	Верхнє 95%	Нижнє 95,0%	Верхнє 95,0%
У-перетин	95,47131679	1,317743789	72,45059135	$1,0677 \cdot 10^{-234}$	92,88088322	98,06175036	92,88088322	98,06175036
<i>x1</i>	-83,02423075	2,862729964	-29,00176817	$4,4422 \cdot 10^{-101}$	-88,65181319	-77,39664831	-88,65181319	-77,39664831
<i>x2</i>	-2,751822156	0,223032144	-12,33823118	$6,22473 \cdot 10^{-30}$	-3,190260917	-2,313383395	-3,190260917	-2,313383395
<i>x3</i>	-4,64221358	0,24537642	-18,91874358	$9,93864 \cdot 10^{-58}$	-5,124576937	-4,159850223	-5,124576937	-4,159850223
<i>x12</i>	1,576260255	0,48365115	3,259085096	0,001211609	0,625494115	2,527026396	0,625494115	2,527026396
<i>x13</i>	3,63924295	0,557835758	6,523861004	$2,03782 \cdot 10^{-10}$	2,542643984	4,735841915	2,542643984	4,735841915
<i>x23</i>	0,529491833	0,080793823	6,553617765	$1,70213 \cdot 10^{-10}$	0,370666549	0,688317117	0,370666549	0,688317117
<i>x123</i>	-0,746254255	0,183870132	-4,058594224	$5,92078 \cdot 10^{-05}$	-1,10770795	-0,384800559	-1,10770795	-0,384800559

У першому стовпці «Коефіцієнти» наведені значення параметрів рівняння регресії (згори до низу):

в рядку «Y-перетин» – оцінка параметру a_0 ;

в рядку «Змінна x_1 / x_i » – оцінка параметру a_1 ;

в рядку «Змінна x_2 / x_i » – оцінка параметру a_2 і т.ін.

В другому стовпці «Стандартна похибка» – стандартні похибки параметрів моделі σ_{a_0} , σ_{a_1} , σ_{a_2} і т.ін., тобто середньоквадратичні відхилення параметрів моделі;

В третьому стовпці « t -статистика» наведені розрахункові значення t – критерію Стюдента для кожного параметра: $t_{a_0}^*$, $t_{a_1}^*$, $t_{a_2}^*$ і т.ін. Тобто це – стандартизовані (нормовані) параметри рівняння регресії, які знаходять діленням кожного фактично знайденого параметра (перший стовпець) на його стандартну похибку (другий стовпець);

В четвертій колонці « P -Значення» наведено ймовірність, яка дозволяє визначити значимість параметра регресії.

Для рівня значимості $\alpha = 0,05$,

– якщо P -значення $\geq 0,05$, то параметр a_j ($j = \overline{0, k}$ де k – число параметрів моделі) є незначимим, відповідно гіпотеза $H_0: a_j = 0$ (гіпотеза, про те, що всі коефіцієнти моделі $a_j = 0$) приймається;

– якщо P -значення $< 0,05$, то параметр ($j = \overline{0, k}$ де k – число параметрів моделі) є значимим, відповідно гіпотеза $H_0: a_j = 0$ (гіпотеза, про те, що всі коефіцієнти моделі $a_j = 0$) відхиляється.

Таким чином, в цій колонці знаходять функції, які розраховуються за таким аргументами: стандартизованими t -критеріями Стюдента, обчисленими шляхом ділення t -критеріїв на значення їх стандартних похибок; кількістю ступенів вільності ($n - m$); числами 1 або 2 (якщо між залежною та незалежними змінними є позитивний або негативний зв'язок), то використовується число 1; якщо невідомо, якого зв'язку слід очікувати, то використовується число 2). Взагалі,

якщо $P < 0,05$, то оцінки параметрів рівняння регресії є достовірними і модель відповідає реальній дійсності.

Стовпці «Нижні 95%» та «Верхні 95%» – інтервали довіри для параметрів $a_j, j = \overline{0, k}$. Тобто ці стовпці вміщують нижні та верхні границі 95 % рівня довіри для кожного параметра регресії і виражають довірчі інтервали параметрів. Якщо довірчі інтервали не містять 0, то з 95 % впевненістю можна стверджувати, що всі незалежні змінні x_j додають рівнянню регресії значущу інформацію і можна досить точно описувати розглянутий процес чи явище.

Перевірка на значущість за допомогою t -критерію Стюдента.

В третьому стовпці « t -статистика» наведені розрахункові значення t – критерію Стюдента для кожного параметра: t_{a_0}, t_{a_1} і т.ін. Тобто це – стандартизовані (нормовані) параметри рівняння регресії, які знаходять діленням кожного фактично знайденого параметра (перший стовпець) на його стандартну похибку (другий стовпець).

Проведемо перевірку значущості для параметрів $a_0, a_1, \dots, a_7$:

1. Формулюємо та розглядаємо гіпотези:

$H_0 : a_i = 0$ – оцінка параметра незначуща;

$H_1 : a_i \neq 0$ – оцінка параметра значуща.

2. Розрахункові значення t –критерію Стюдента для параметру a_i беремо зі стовпчика « t -статистика».

3. Обчислюємо t -критичне (табличне) значення за формулою:

$$t = \frac{\overline{x_1} + \overline{x_2}}{\sqrt{m_1^2 + m_2^2}}, \quad t_{кр} = 1,96581 \quad (3.44)$$

4. Перевірка умови $|t_{a_i}| > t_{кр}$

t_{a_i}	$t_{кр}$
72,45059135	
29,00176817	
12,33823118	
18,91874358	> 1,96581
3,259085096	
6,523861004	
6,553617765	

Умова справджується, що означає, що нульова гіпотеза відкидається і параметр a_i генеральної сукупності є статистично значущим.

Проведення аналізу якості моделі за допомогою за даними колонки « P -Значення»:

В четвертій колонці « P -значення» наведено ймовірність, яка дозволяє визначити значимість параметра регресії.

Для рівня значимості $\alpha = 0,05$,

– якщо P -значення $\geq 0,05$, то параметр a_j ($j = \overline{0, k}$ де k – число параметрів моделі) є незначимим, відповідно гіпотеза $H_0: a_j = 0$ (гіпотеза, про те, що всі коефіцієнти економетричної моделі $a_j = 0$) приймається;

– якщо P -значення $< 0,05$, то параметр ($j = \overline{0, k}$ де k – число параметрів моделі) є значимим, відповідно гіпотеза $H_0: a_j = 0$ (гіпотеза, про те, що всі коефіцієнти економетричної моделі $a_j = 0$) відхиляється.

$$\begin{array}{l}
 P\text{-значення} \\
 1,0677 \cdot 10^{-234} \\
 4,4422 \cdot 10^{-101} \\
 6,22473 \cdot 10^{-30} \\
 9,93864 \cdot 10^{-58} < 0,05 \\
 0,001211609 \\
 2,03782 \cdot 10^{-10} \\
 1,70213 \cdot 10^{-10} \\
 5,92078 \cdot 10^{-05}
 \end{array}$$

Отже, порівнюючи значення наведені в колонці « P -значення» з $0,05$, можемо сказати, що вони є значно меншими за $0,05$. З чого робимо висновок про статистичну значимість параметрів $a_0 \dots a_7$.

3.6 Висновки за розділом

1. Представлена методика експериментальних досліджень евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності дала змогу створити емпіричні табличні дані щодо параметрів руху змішаних евакуаційних потоків, а саме встановити залежності між швидкістю руху учасників евакуації та щільності

потоків. Отримані дані були використані в наступних дослідженнях евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності і дозволили встановити залежності швидкості руху від щільності для кожної конфігурації потоку та виведення коефіцієнта адаптації людського потоку до зміни його щільності під час руху з різним відсотковим співвідношенням учасників груп мобільності M1, M3 та M4.

2. За результатами проведених експериментальних досліджень руху змішаного потоку людей з різними параметрами мобільності (M1, M3, M4) встановлено значний вплив цих параметрів на динаміку евакуаційного процесу. У випадку з параметрами M1 (90 %), M3 (3,33 %) та M4 (6,67 %) зафіксовано середнє відсоткове зниження швидкості потоку на рівні 54,86 %, при одночасному збільшенні середньої щільності потоку на 42,38 %. Середнє значення швидкості потоку становить приблизно 38,28 м/хв. Це вказує на те, що середня швидкість потоку людей у вибірці знаходиться на цьому рівні.

3. Проведено експериментальні дослідження евакуації з ТРЦ з перебуванням у ньому осіб груп мобільності M4 та їх рятування пожежно-рятувальними підрозділами за допомогою пожежних ліфтів. Встановлено, що розподіл відвідувачів на території ТРЦ був нерівномірним. Найбільша кількість людей була в продуктових відділах і відділах жіночого одягу. На поведінку більшої частини людей (60 – 70 %) сигнал про небезпеку не вплинув або вплинув незначною мірою. Найбільш ефективно вплинув на початок евакуації персонал ТРЦ. Більшість відвідувачів обрали найближчий вихід для евакуації. Під час вибору напрямку руху відвідувачі не розрізняли виходи за призначенням (евакуаційний або звичайний).

Загальний час евакуації з будівлі склав 10,61 хв. Більша частина загального часу евакуації пішла на те, щоб люди отримали інформацію про пожежу, оцінили ситуацію і прийняли рішення залишити будівлю.

Час евакуації відвідувачів, котрі пересувались на кріслах колісних з пожежобезпечних зон за допомогою пожежно-рятувальних підрозділів, склав 5,55 хв. Загальний час евакуації відвідувачів на кріслах колісних, в який входить

час прямування до пожежобезпечної зони, час очікування на пожежно-рятувальні підрозділи та евакуації, склав 9,81 хв.

Наявність великої кількості розмежованих виходів, широких комунікаційних шляхів дало змогу уникнути високих щільностей людських потоків на шляхах евакуації і не перевищувати значення 1 люд/м^2 .

Після порівняння та аналізу відеоматріалів встановлено, що евакуація відвідувачів, які пересувались на кріслах колісних і які не вагаючись почали прямувати до пожежобезпечних зон одразу після спрацювання сигналу про пожежну небезпеку, було завершено раніше, ніж закінчилася евакуація відвідувачів без особливих потреб.

З огляду на отримані дані можна припустити, що таке ставлення відвідувачів до сигналів про пожежу небезпечне і в реальній ситуації може призвести до трагічних наслідків.

Аналіз евакуації людей з ТРЦ дав змогу зробити висновок, що одним із вирішальних факторів, які впливають на процес евакуації людей, є грамотні дії персоналу.

Також за допомогою проведеного експерименту було відпрацьовано дії персоналу в умовах пожежі.

4. Перевірено адекватність експериментальних даних шляхом порівняння їх з результатами комп'ютерного моделювання, що підвищує надійність отриманих результатів. Різниця між результатами моделювання та натурного експерименту не перевищує суттєвих значень різниці в часі, що свідчить про адекватність побудованих моделей. Це, своєю чергою, дозволило оцінити правильність проведеного експерименту та розширити межі експериментальних досліджень щодо відтворення процесів евакуації людських потоків, включаючи маломобільні групи населення М1, М3 та М4, без залучення додаткових матеріальних і людських ресурсів та часу.

5. За результатами чисельного експерименту з використанням математичних моделей виявлено залежність впливу щільності потоку (D), частки учасників, що користуються опорами (М3), та частки учасників, які

пересуваються на візках (М4) на швидкість руху людського потоку. Залежність швидкості змішаного людського потоку від щільності та відсоткового співвідношення учасників груп мобільності М1, М3 та М4 має вигляд:

$$V_{\text{сер}} = 95,47131679 - 83,02423075D_{\text{сер}} - 2,751822156\alpha_{\text{М3}} - 4,64221358\alpha_{\text{М4}} + \\ + 1,576260255D_{\text{сер}}\alpha_{\text{М3}} + 3,63924295D_{\text{сер}}\alpha_{\text{М4}} + 0,529491833\alpha_{\text{М3}}\alpha_{\text{М4}} - \\ - 0,746254255D_{\text{сер}}\alpha_{\text{М3}}\alpha_{\text{М4}}$$

6. Обґрунтовано, що результати, отримані в ході кожного окремого експериментального дослідження, є адекватними, оскільки їх відносні та середньоквадратичні відхилення від усереднених даних становлять 0,20 %; 3,26 %; 3,34 %; 17,91 %, а критерії Фішера та Стьюдента не перевищують критичних значень.

РОЗДІЛ 4 РОЗРАХУНОК ЧАСУ ЕВАКУАЦІЇ ЛЮДЕЙ У РАЗІ ПОЖЕЖІ З ТОРГОВЕЛЬНО-РОЗВАЖАЛЬНОГО ЦЕНТРУ З ПЕРЕБУВАННЯМ У НЬОМУ МАЛОМОБІЛЬНИХ ГРУП НАСЕЛЕННЯ

4.1 Визначення розрахункового часу евакуації людей з будівлі торговельно-розважального центру за допомогою індивідуально-поточної моделі

Методика розрахунку евакуації людей в разі пожежі із застосуванням індивідуально-поточної моделі наведена в розділі 2.

Розрахунок виконано в програмному забезпеченні Pathfinder (США), яке реалізує індивідуально-поточкову модель руху людей під час евакуації з урахуванням емпіричних даних, отриманих в ході експериментальних досліджень. Дані дослідження були спрямовані на визначення характеристик руху різних груп відвідувачів у реальних умовах, що дозволило створити більш точну і надійну модель евакуації, враховуючи специфіку поведінки МГН. Математичний алгоритм моделі наведено в розділі 3.

Відповідно до методичних підходів, що викладені в [5], розрахунковий час евакуації людей з приміщень та будинків встановлюється за розрахунком тривалості руху одного або декількох людських потоків через евакуаційні виходи від найбільш віддалених місць розміщення людей до виходу назовні. Кількість МГН в будівлі приймалася М3 (5 %) та М4 (5 %).

Евакуація людей з службових, технічних, підсобних, побутових та санітарно-гігієнічних приміщень враховувалась із розрахунку не менше однієї людини в одному приміщенні.

Для розрахунку приймаємо сценарій виникнення пожежі за якого реалізуються найгірші умови для евакуації людей та (або) найбільш висока динаміка наростання небезпечних чинників пожежі.

Згідно з розрахунковою моделлю пожежі приймаємо, що евакуація людей у межах будівлі розпочинається одночасно після спрацювання систем пожежної

сигналізації та оповіщення людей про пожежу. Згідно з проєктною документацією будівля обладнана СОУЕ 4 типу.

Розрахункова модель, розташування виходів через які відбувається евакуація людей та загальна схема розташування агентів до моменту евакуації наведено на рис. 4.1–4.7.

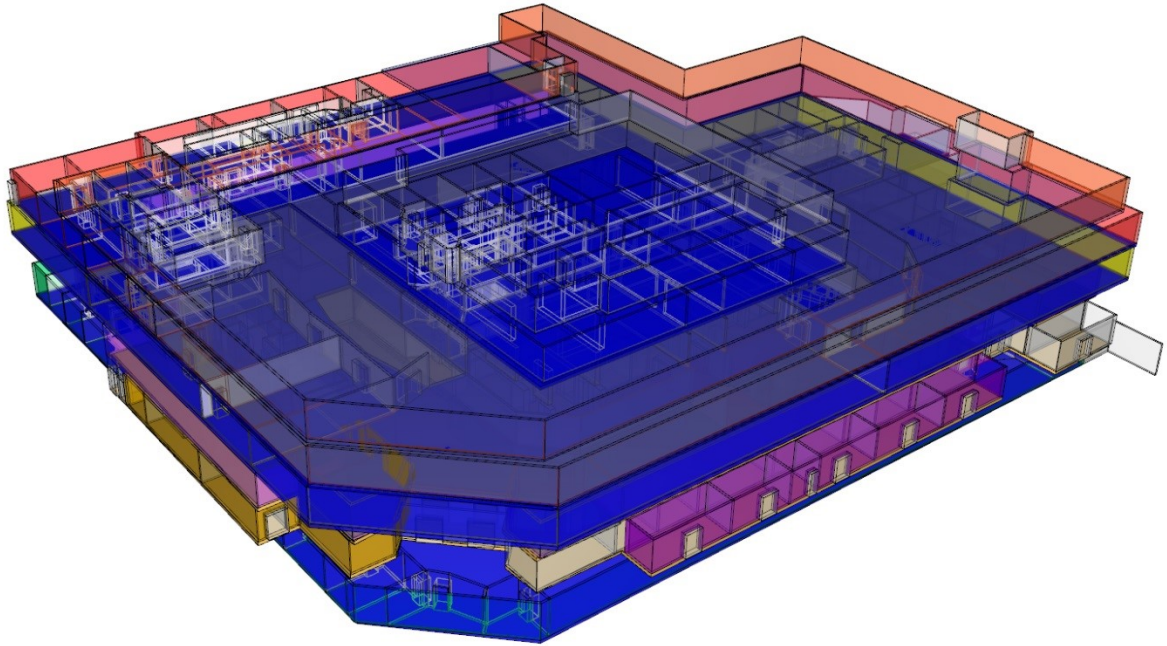


Рисунок 4.1 – Зовнішній вигляд розрахункової моделі

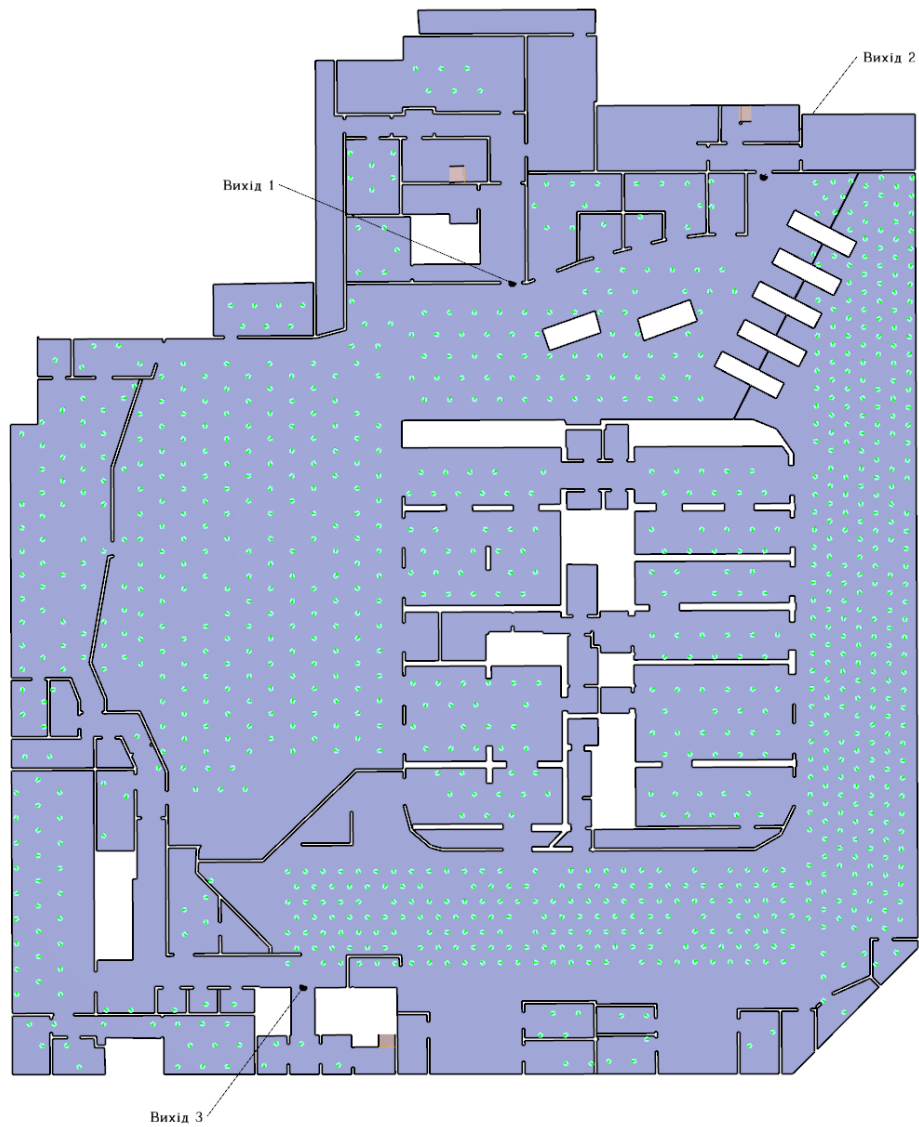


Рисунок 4.2 – Схема розташування евакуаційних виходів та агентів на -1 поверсі

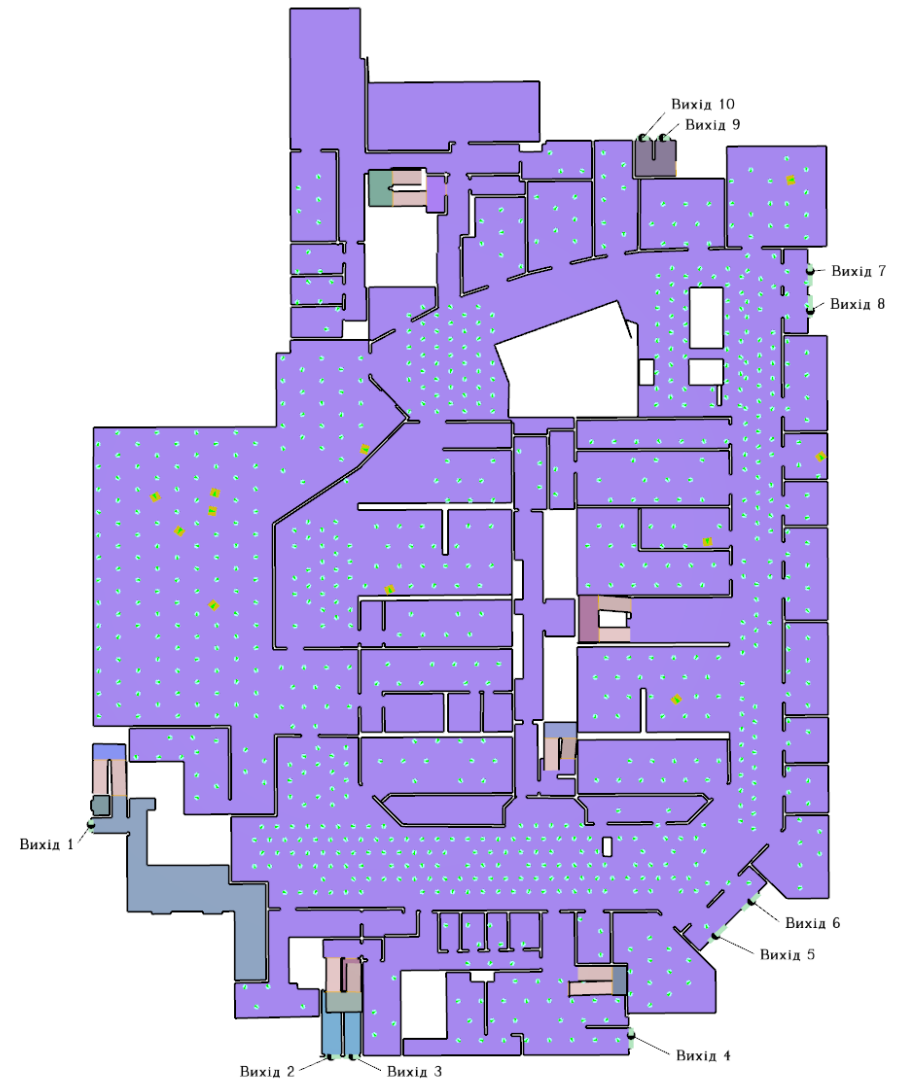


Рисунок 4.3 – Схема розташування евакуаційних виходів та агентів на 1 поверсі

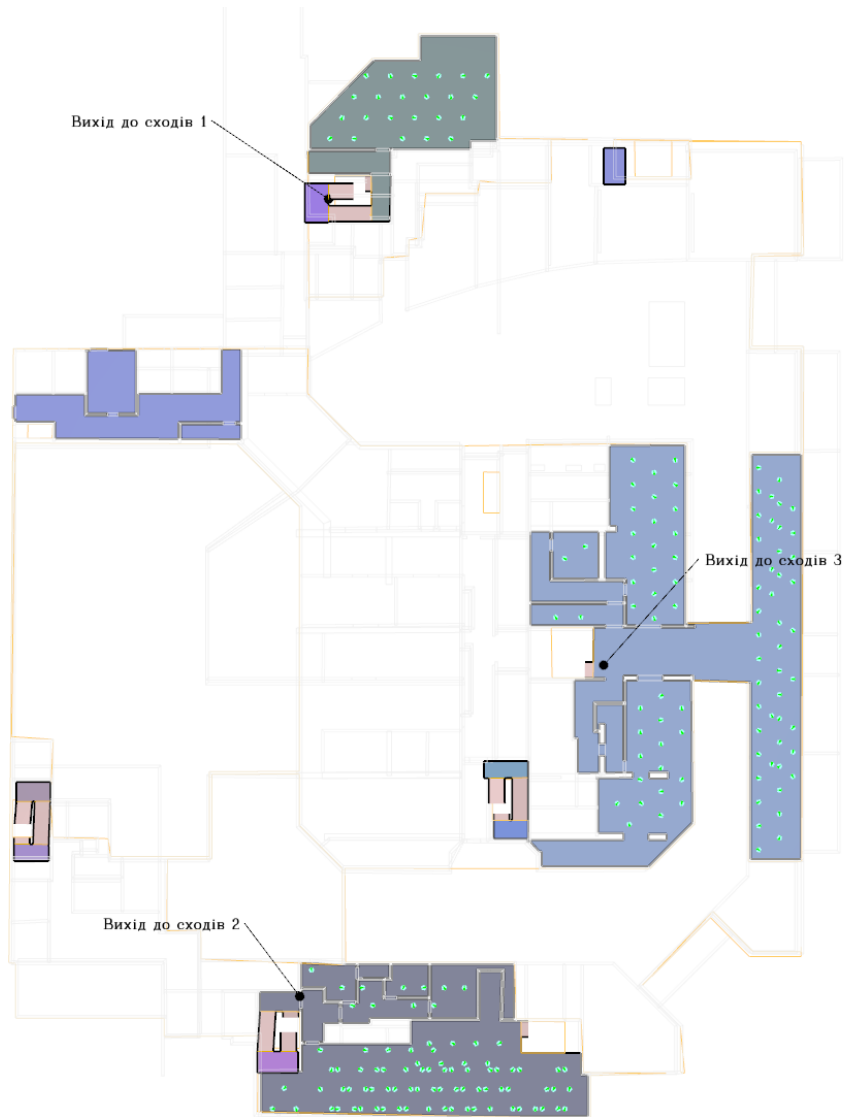


Рисунок 4.4 – Схема розташування евакуаційних виходів та агентів на 1 поверсі (антресоль)

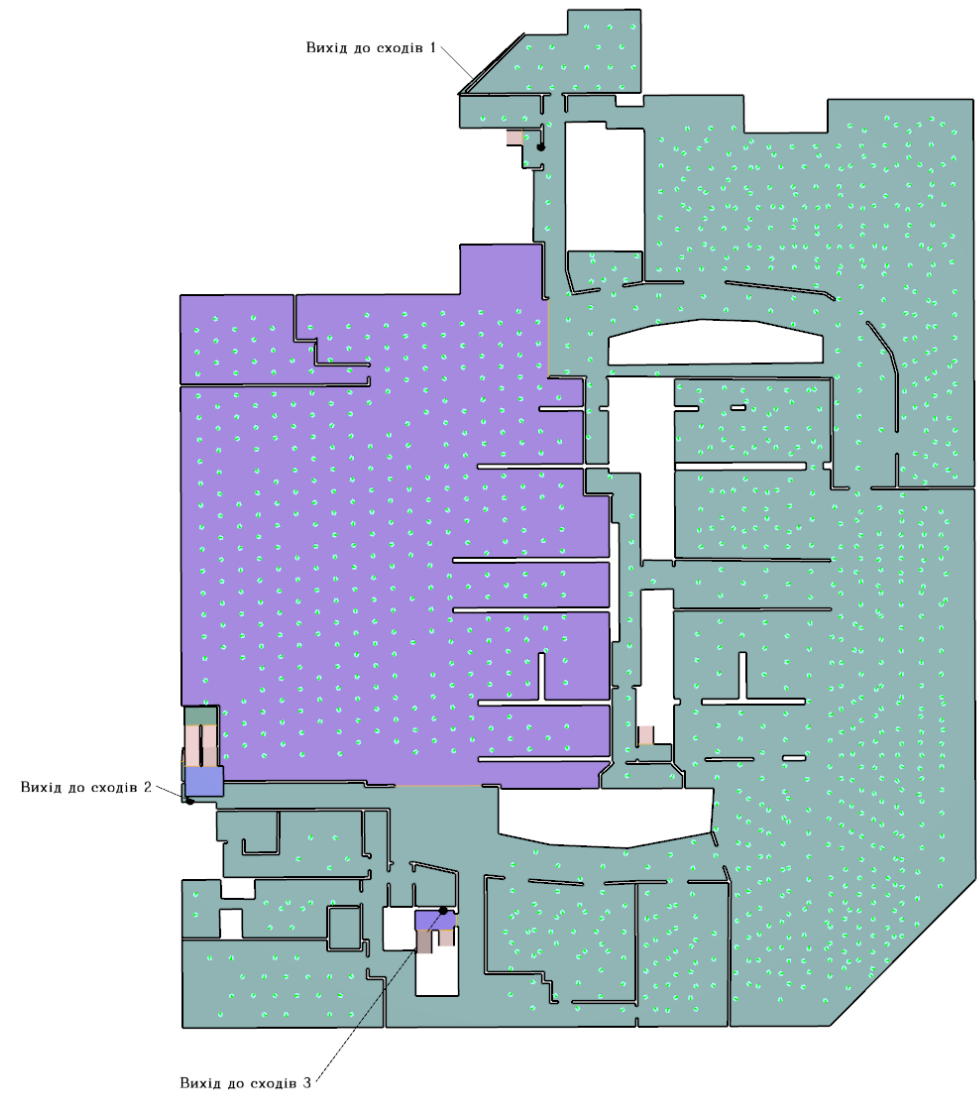


Рисунок 4.5 – Схема розташування евакуаційних виходів та агентів на 2 поверсі

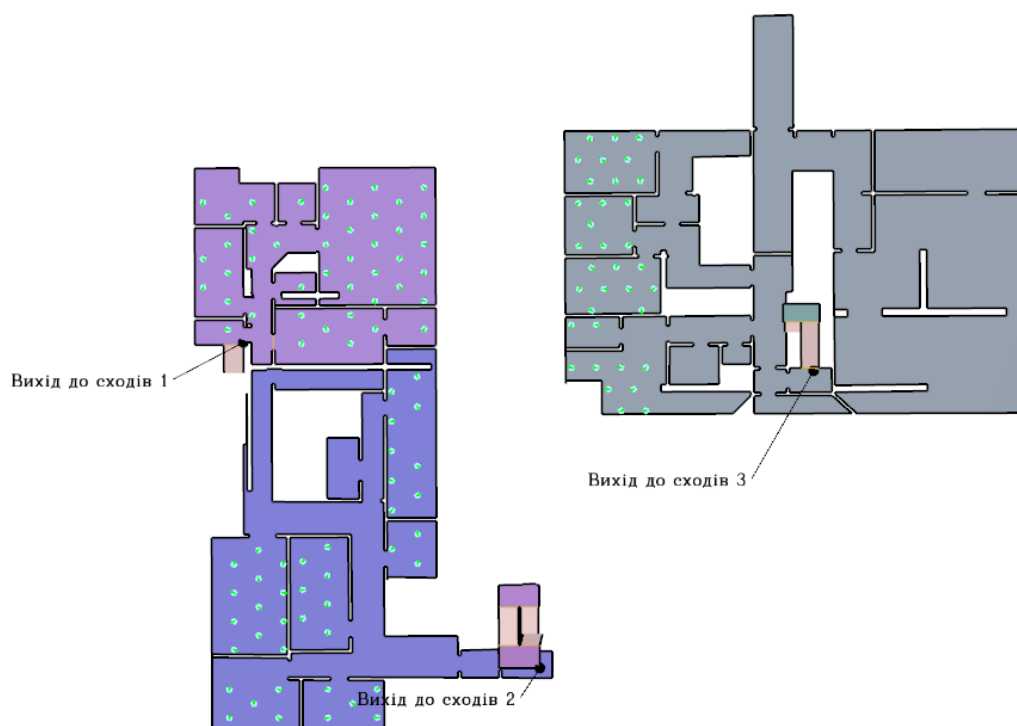


Рисунок 4.6 – Схема розташування евакуаційних виходів та агентів на 2 поверсі (антресоль)

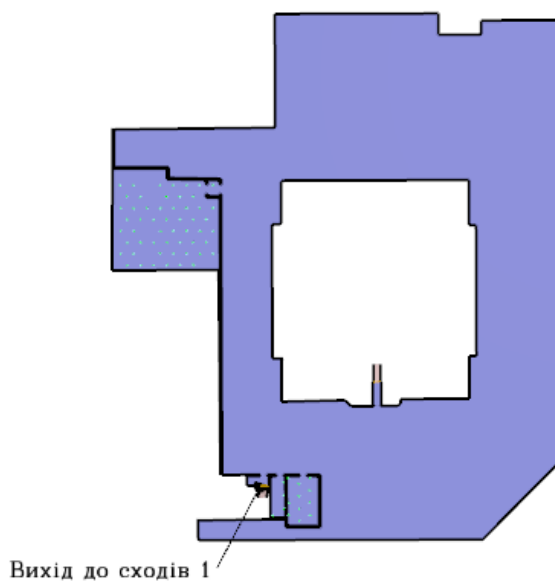


Рисунок 4.7 – Схема розташування евакуаційних виходів та агентів на 5 поверсі

Використання приміщень та шляхів евакуації агентами на протязі всього слідування у відносно безпечні зони наведено на рис. 4.8–4.18. Дані для проведення розрахунків приймалися згідно з [5] та урахуванням емпіричних даних, отриманих в ході експериментальних досліджень.

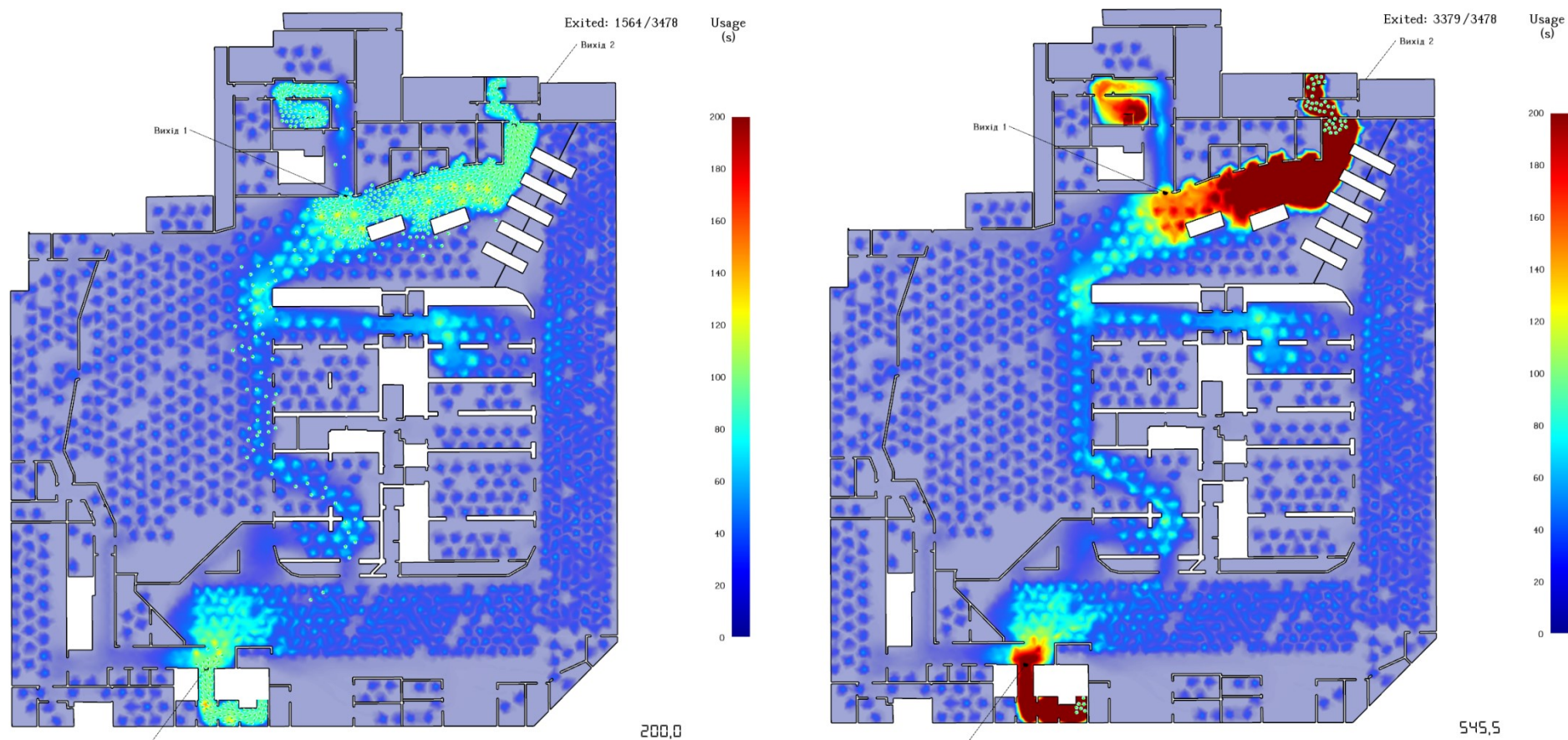


Рисунок 4.8 – Використання приміщень та шляхів евакуації агентами на -1 поверсі

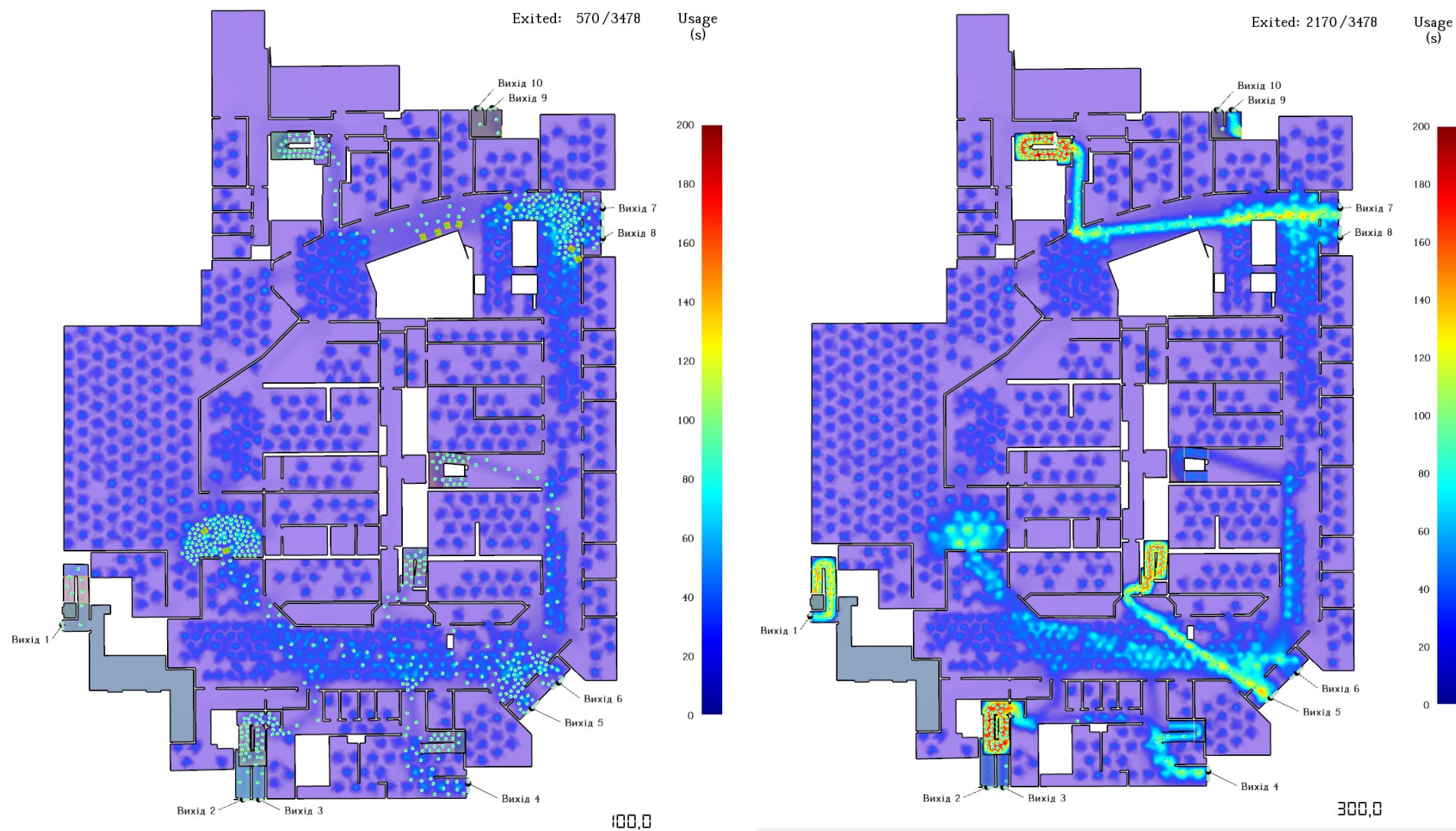


Рисунок 4.9 – Використання приміщень та шляхів евакуації агентами на 1 поверсі

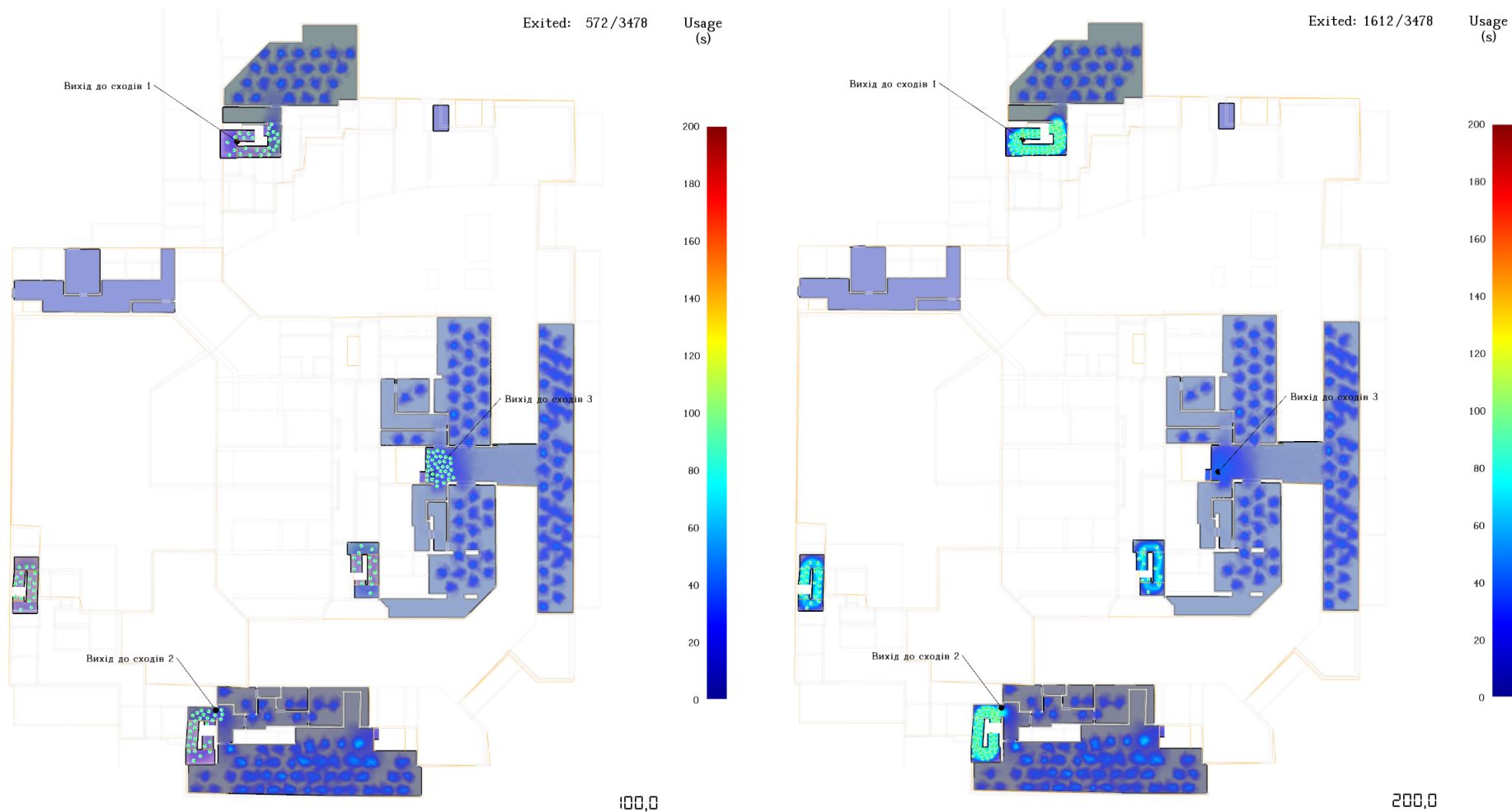
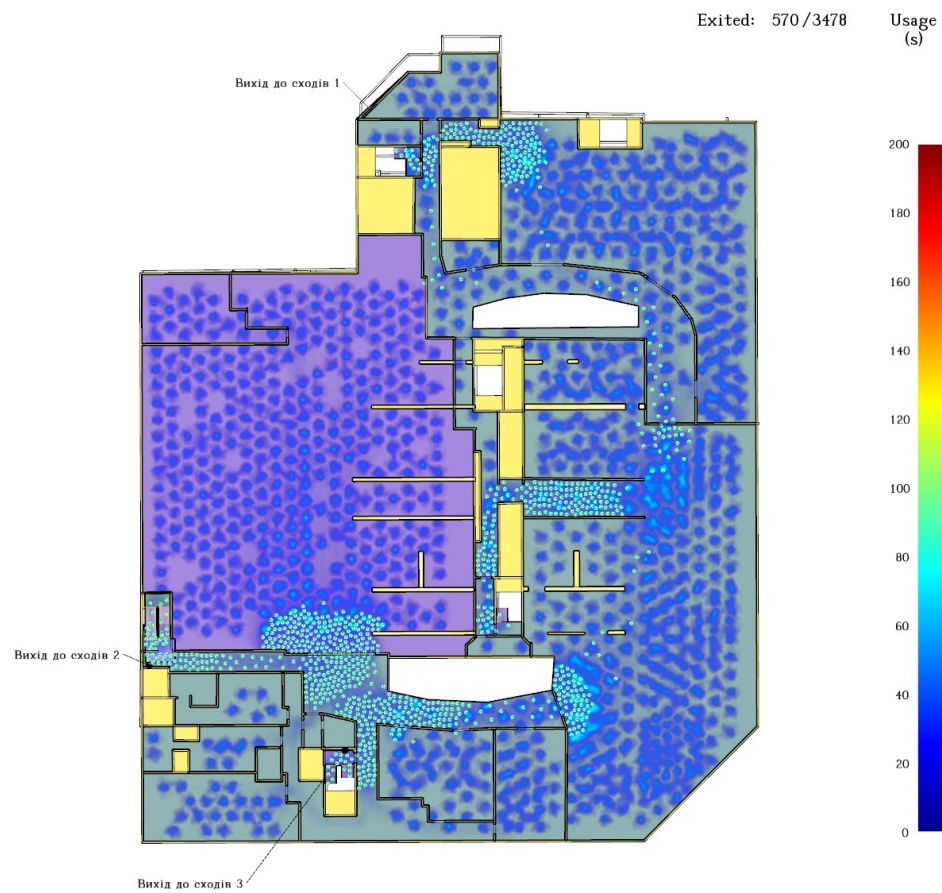
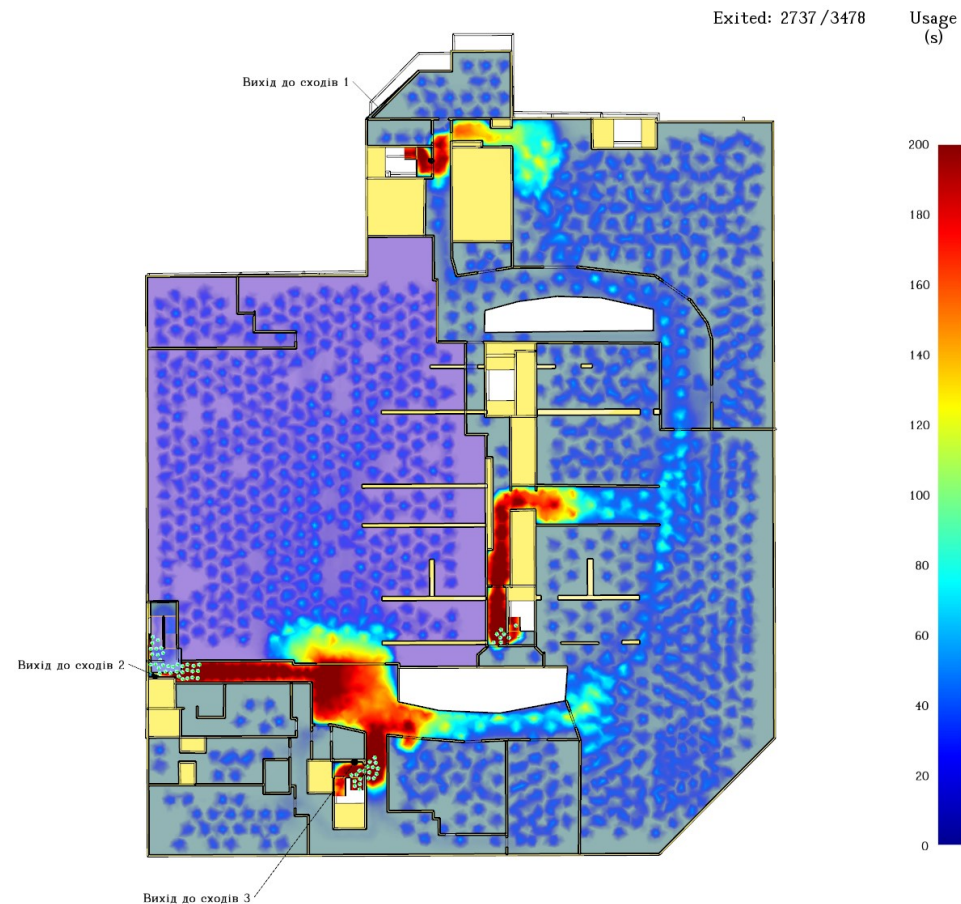


Рисунок 4.10 – Використання приміщень та шляхів евакуації агентами на 1 поверсі (антресоль)



100,0



398,5

Рисунок 4.11 – Використання приміщень та шляхів евакуації агентами на 2 поверсі

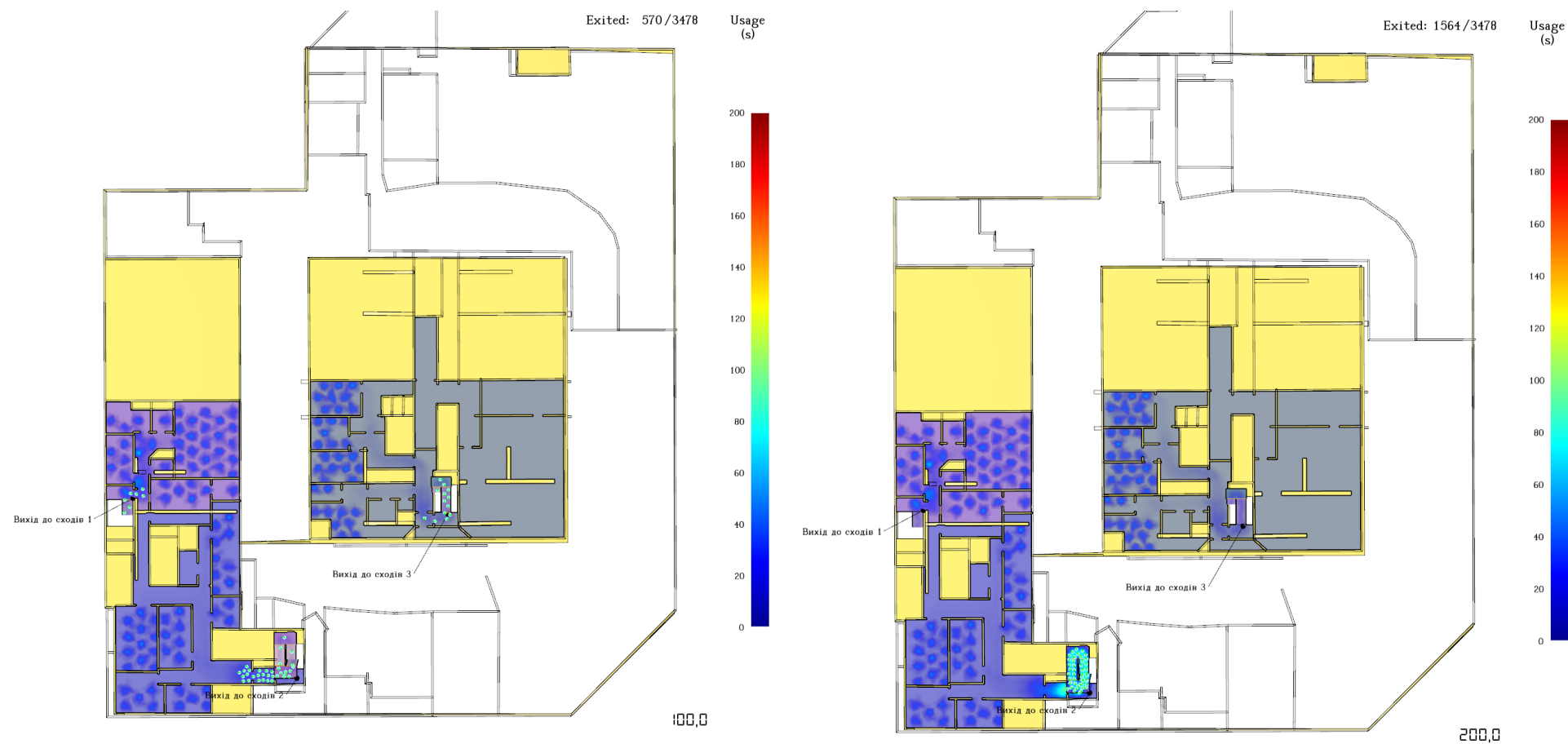


Рисунок 4.12 – Використання приміщень та шляхів евакуації агентами на 2 поверсі (антресоль)

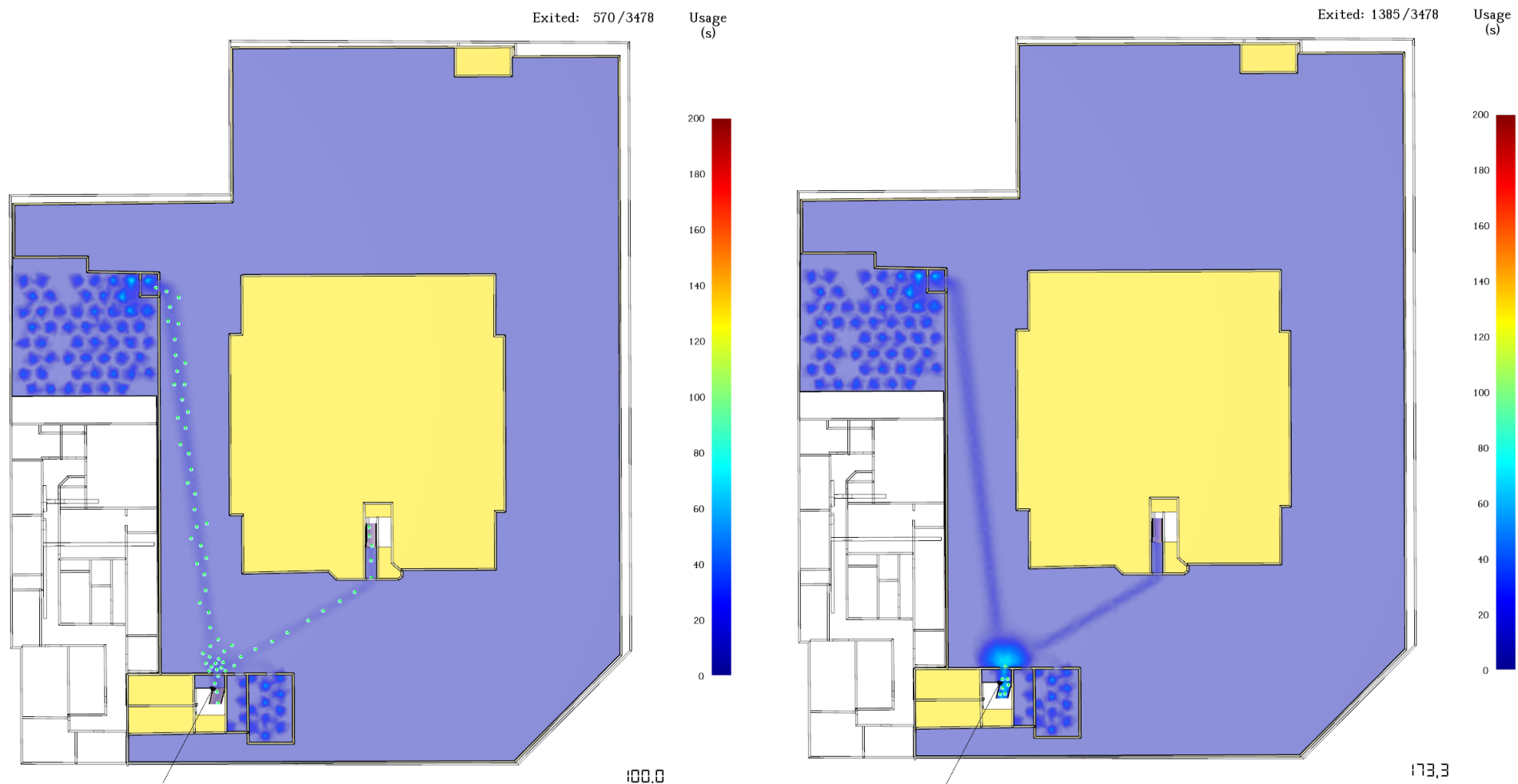


Рисунок 4.13 – Використання приміщень та шляхів евакуації агентами на 5 поверсі

Залежність нижче (рис. 4.14) показує динаміку виходу та швидкість потоку агентів крізь евакуаційні виходи на першому поверсі.

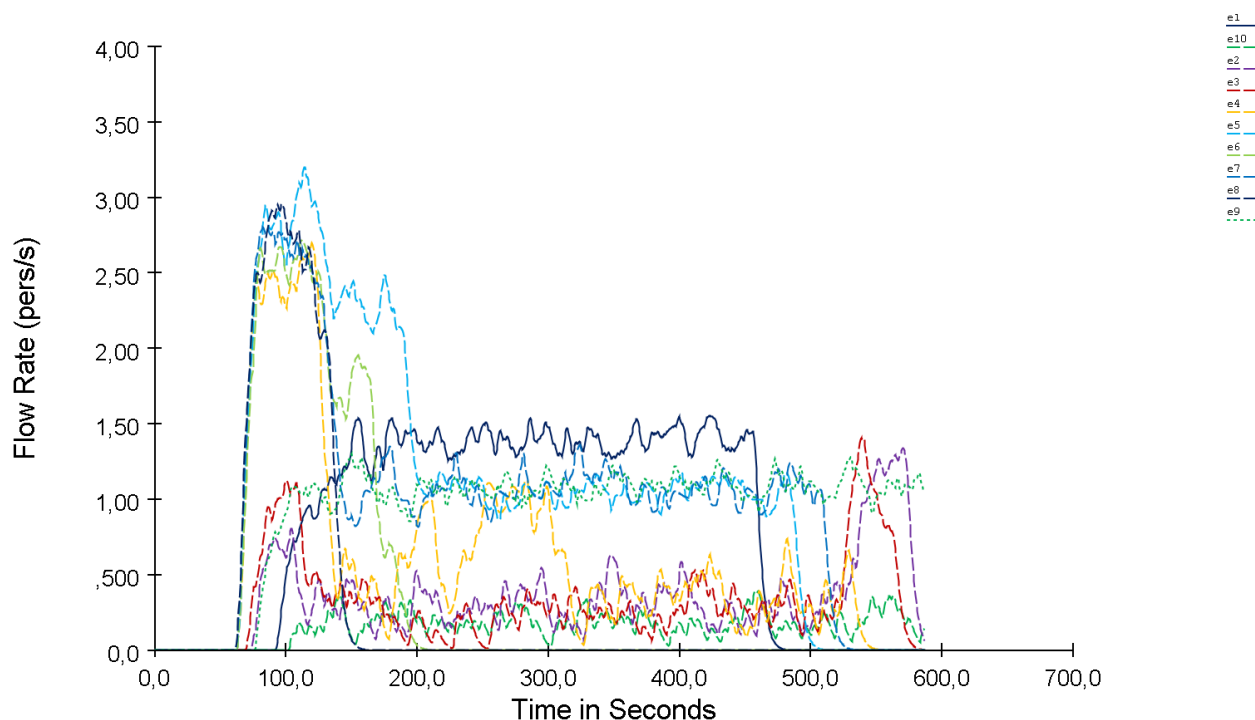


Рисунок 4.14 – Залежності швидкості потоків агентів від часу на евакуаційних виходах першого поверху

За результатами розрахунку визначено, що розрахунковий час евакуації людей від найвіддаленішої точки поверху до виходу з неї складає 587 с (9,7 хв) з урахуванням часу початку евакуації згідно з таблицею А.3 [5]. Наступним етапом моделювання буде розрахунок тривалості настання небезпечних чинників пожежі та порівняння їх результатів із фактичним часом евакуації.

Розшифровані результати моделювання руху потоку агентів наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Результати розрахунку часу евакуації під час пожежі з будівлі ТРЦ

№ виходу	Час евакуації людей до виходу (до місця відносної безпеки), с	Кількість агентів, що евакуюється, осіб	Інтенсивність руху агентів через отвори, осіб/сек.
-1 поверх			
Вихід до сходів 1	307	130	0,92
Вихід до сходів 2	556	435	1,26
Вихід до сходів 3	283	471	0,59
Час евакуації з поверху, с			556
1 поверх			
Exit 1	454	486	1,31
Exit 2	570	266	0,57
Exit 3	560	187	0,49
Exit 4	526	349	0,68
Exit 5	484	629	1,26
Exit 6	185	233	0,34
Exit 7	506	576	1,27
Exit 8	135	178	1,81
Exit 9	587	549	1,08
Exit 10	582	92	0,17
Час евакуації з поверху, с			587
1 поверх (антресоль)			
Вихід до сходів 1	89	23	0,78
Вихід до сходів 2	124	120	1,08
Вихід до сходів 3	115	39	0,47
Час евакуації з поверху, с			124
2 поверх			
Вихід до сходів 1	328	415	0,9
Вихід до сходів 2	415	400	0,8
Вихід до сходів 3	377	225	0,24
Час евакуації з поверху, с			415
2 поверх (антресоль)			
Вихід до сходів 1	102	36	0,14
Вихід до сходів 2	132	34	0,44
Вихід до сходів 2	106	35	0,45
Час евакуації з поверху, с			315
5 поверх			
Вихід до сходів 1	170	189	0,58
Час евакуації з поверху, с			170

4.2 Розрахунок часу від початку пожежі до блокування небезпечними чинниками пожежі шляхів евакуації та евакуаційних виходів в будівлі ТРЦ із використанням польової моделі

Критичний час по кожному з небезпечних чинників пожежі (НЧП) визначається як тривалість досягнення цим чинником гранично допустимого значення на шляхах евакуації на висоті 1,7 м від підлоги.

Гранично допустимі значення за кожним з небезпечних чинників пожежі складають:

- за підвищеною температурою – 60 °С;
- за тепловим потоком – 2500 Вт/м²;
- за втратою видимості – 20 м (у разі, коли обидва горизонтальні лінійні розміри приміщення менше 20 м, гранично допустиму відстань щодо втрати видимості слід приймати рівною найбільшому горизонтальному лінійному розміру);
- за зниженим вмістом кисню – 0,226 кг/м³;
- за кожним з токсичних газоподібних продуктів згоряння (CO₂ – 0,11 кг/м³; CO – 1,16·10⁻³ кг/м³; HCL – 23·10⁻⁶ кг/м³).

Необхідно відзначити, що за використання польової моделі визначення критичного часу має істотні особливості, пов'язані з тим, що критичне значення в різних точках приміщення досягається неодноразово. Для приміщень із порівнянними горизонтальними розмірами критичний час визначається як максимальне з критичних часів для евакуаційних виходів із даного приміщення (час блокування останнього виходу).

Час від початку пожежі до блокування евакуаційних шляхів в результаті поширення на них НЧП визначається шляхом вибору з отриманих в результаті розрахунків значень критичної тривалості пожежі мінімального часу

$$t_{\text{ол}} = \min \{ t_{KP}^T, t_{KP}^{П.В}, t_{KP}^{O_2}, t_{KP}^{T.Г} \}.$$

Моделювання поширення НЧП в будівлі ТРЦ було виконано із використанням польової моделі [5].

До основних факторів, що визначають термогазодинамічні умови пожежі при застосуванні польового моделювання відносять:

- тепловтрати крізь будівельні конструкції приміщення; стискаємість (зміна густини) газів;
- градієнти тиску;
- поступлення у приміщення продуктів піролізу горючої речовини; променевий теплообмін;
- протікання хімічних реакцій;
- ожливість спільного існування декількох фазових станів речовин;
- турбулентність та відповідні перехідні режими;
- шорсткість поверхонь.

Поряд з цим, при польовому моделюванні динаміки розвитку НЧП застосовують припущення щодо незворотності хімічної реакції горіння, відсутності взаємного впливу турбулентності та теплового випромінювання, відсутності термо- та бародифузії.

Зрозуміло, що застосування польового моделювання динаміки розвитку НЧП дозволяє отримати більш адекватний реальним процесам тепло- та масо переносу опис пожежі. В той же час, складність розрахунку польових моделей вимагає застосування потужного обчислювального обладнання.

Виходячи з вищевикладеного, для проведення моделювання в рамках цієї роботи обрано програмний комплекс FDS (Fire Dynamics Simulator). Даний програмний комплекс розроблено Національним інститутом стандартів і технологій (NIST) США з залученням науково-дослідних організацій США, Канади і Фінляндії.

FDS реалізує обчислювальну гідродинамічну модель (CFD) тепло-масо переносу при горінні на основі польового методу моделювання. FDS чисельно вирішує рівняння Нав'є-Стокса для низько-швидкісних температурно-залежних потоків, при цьому особлива увага приділяється розповсюдженню диму і теплопередачі при пожежі. Модель являє собою систему рівнянь у часних похідних, що включає в себе рівняння збереження маси, моменту і енергії, та

вирішується на тривимірній постійній сітці. Теплове випромінювання розраховується методом скінченних об'ємів на цій же сітці. Для моделювання розповсюдження диму, використовуються Лангранджеві частинки.

На сьогоднішній день приблизно половина додатків моделі використовується для проектування систем управління димом і вивчення спрацювання спринклерів та сповіщувачів. Інша половина використовується для відтворення картини пожежі у житлових, громадських і промислових приміщеннях. Головною метою FDS протягом всього періоду свого розвитку являється вирішення прикладних задач пожежної безпеки і вивчення фундаментальних процесів при пожежі.

В основу математичної моделі FDS закладено використання диференціальних рівнянь у часних похідних, що описують просторово-часовий розподіл температури і швидкостей газового середовища в приміщенні, концентрацій компонентів газового середовища (кисню, продуктів згорання і ін.), тиску і густини.

У звичайному вигляді система рівнянь Нав'є – Стокса складається – рівняння руху та рівняння нерозривності.

У векторному вигляді для нестисливої рідини їх записують у такий спосіб:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0, \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V) + \nabla[\rho V \otimes V] = -\nabla p + \nabla \left[(\mu + \mu_t) (\nabla V + (\nabla V)^T) \right] + S, \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla(\rho V h) = \nabla \left(\left(\frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right) + Q_{rad}, \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_k) + \nabla(\rho V Y_k) = \nabla \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_k \right) + Q_k, \quad (4.4)$$

де t – час; ρ – густина; V – вектор відносної швидкості; p – відносний тиск; μ – молекулярна динамічна в'язкість; μ_t – турбулентна динамічна в'язкість; λ – коефіцієнт теплопровідності суміші; Pr_t – турбулентне число Прандтля;

Sc – число Шмідта; Sc_t – турбулентне число Шмідта; Y_k – концентрація k -го компонента реакції горіння.

Статичну ентальпію h суміші визначають за виразом:

$$h = h_0 + \int_{T_0}^T c_p dT + \sum_k Y_k H_k, \quad (4.5)$$

де T – температура; h_0 – початкова ентальпія за температури T_0 ; $c_p = \sum_k Y_k c_{p,k}$ – теплоємність суміші за постійного тиску; H_k – теплота утворення k -го компонента.

Початковий член рівняння (4.2) S визначають за виразом:

$$S = (\rho - \rho_{hyd})g + \rho B, \quad (4.6)$$

де ρ_{hyd} – гідростатична густина; g – вектор гравітаційних сил; B – вектор сил обертання (центробіжної та Кориоліса), що обраховують за формулою:

$$B = -2\omega \times V, \quad (4.7)$$

де ω – вектор кутової швидкості.

Для визначення турбулентної в'язкості застосовують різні варіанти, пов'язані зі способами визначення опосередкованих і флуктуаційних складників величин, що входять до рівняння Нав'є – Стокса. Ці способи визначення турбулентної динамічної в'язкості називають моделями турбулентності. Найбільше поширення має стандартна k - ε модель турбулентності. Згідно з цією моделлю, динамічну турбулентну в'язкість визначають за виразом:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (4.8)$$

де $C_\mu = 0,09$ – сталий коефіцієнт; ε – швидкість дисипації турбулентної енергії; k – турбулентна енергія.

Для визначення величин ε і k використовують рівняння, які доповнюють систему рівнянь Нав'є – Стокса, що мають вигляд:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho V k) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \mu_t G - \rho \varepsilon, \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho V \varepsilon) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t G - C_2 f_1 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (4.10)$$

де G – величина, яку визначають за виразом:

$$G = D_{ij} \frac{\partial V_i}{\partial x_j}, \quad (4.11)$$

де величину D_{ij} визначають як

$$D_{ij} = S_{ij} - \frac{2}{3} \left(\nabla \cdot \mathbf{V} + \frac{\rho k}{\mu_t} \right) \delta_{ij}, \quad (4.12)$$

Величину δ_{ij} , яка входить до рівняння (4.2), визначають як:

$$S_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}. \quad (4.13)$$

Інші параметри, що входять до рівняння (4.2) і (4.3), є постійними.

Для замикання системи рівнянь (4.1) – (4.4) використовують рівняння стану ідеального газу. Для суміші газів його записують у вигляді:

$$p = \rho R_0 T \sum_k \frac{Y_k}{M_k}, \quad (4.14)$$

де R_0 – універсальна газова стала; M_k – молярна маса k -го компонента.

Рівняння, що описують горіння у двофазному потоці повітря й часток рідкого палива.

Горіння представляє узагальнена хімічна вуглеводнева формула $C_x H_y O_z$ ($C_6 H_6 O$). Теплоту згорання рідкого палива визначають за такою формулою:

$$\text{LHV}_{\text{liq.fuel}} = h_{\text{liq.fuel}}^0 - h_{\text{CO}_2}^0 \frac{44x}{12x + y + 16z} - h_{\text{H}_2\text{O}}^0 \frac{9y}{12x + y + 16z}, \quad (4.15)$$

де $h_{\text{liq.fuel}}^0$, $h_{\text{CO}_2}^0$, $h_{\text{H}_2\text{O}}^0$ – теплоти утворення, вуглекислого газу й води; x , y , z – стехіометричні коефіцієнти для гасу, що дорівнюють відповідно 6, 6 і 0.

Газова фаза являє собою суміш із п'яти газів, тому основна система (4.1) – (4.4) доповнена ще п'ятьма рівняннями для кожного зі складників суміші газів: летких $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z$, O_2 , N_2 , H_2O і CO_2 , що мають вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_k) + \nabla(\rho V Y_k) = \nabla \left(\left(\rho D_i + \frac{\mu_t}{\text{Sc}_t} \right) \nabla Y_k \right) + Q_i^P + Q_i^{\text{chem}}. \quad (4.16)$$

де вихідний член Q_i^{chem} дорівнює швидкості бруто-реакції газозфазного горіння для першого рівняння летких, для інших – рівний нулю.

Вихідні члени компонентів суміші для основних рівнянь системи (4.1) – (4.4) визначені за виразами:

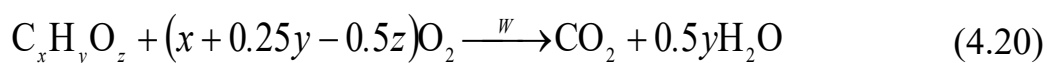
$$Q_i^P = \sum_j (m_{i,\text{in}} - m_{i,\text{out}})_j \frac{N_{pj}}{\Omega_{\text{cell}}}, \quad (4.17)$$

$$\bar{Q}_{\text{mom}}^P = \sum_j \frac{\pi r_p^2}{2} C_{Dj} \rho_g |V_g - V_p| (V_g - V_p)_j \frac{N_{pj}}{\Omega_{\text{cell}}}, \quad (4.18)$$

$$Q_{\text{enth}}^P = \sum_j (m_{i,\text{in}} h_{i,\text{in}} - m_{i,\text{out}} h_{i,\text{out}})_j \frac{N_{pj}}{\Omega_{\text{cell}}}. \quad (4.19)$$

де індекс i стосується газового компонента, а індекс j – відповідної траєкторії частки; N_{pj} – число часток, що пролітають за секунду по траєкторії; Ω_{cell} – об'єм розрахункового осередку; C_{Dj} – коефіцієнт опору часток, що летять по траєкторії; ρ_g – щільність газової фази; r_p – радіус частки.

Модель горіння визначають й витратами палива, окисника і продуктів згорання. Кількісні співвідношення визначені за узагальненим хімічним рівнянням:



Швидкість реакції W визначають за стехіометричним коефіцієнтом:

$$i_{chem} = \frac{32(x + 0.25y - 0.5z)}{12x + y + 16z}, \quad (4.21)$$

Для обліку променистого теплообміну в газовому середовищі та взаємного теплообміну між середовищем і частками, а також твердим матеріалом доцільно використовувати дифузійну модель випромінювання газу (P1). Ця модель побудована на припущенні, що оптичне середовище ізотропне, процес радіаційного теплопереносу описаний рівнянням:

$$\nabla \left(\frac{1}{\alpha + \beta} \nabla E_r \right) + 3(\alpha E_b - \alpha E_r) = 0, \quad (4.22)$$

де E_r – щільність енергії випромінювання; E_b – рівноважна щільність енергії випромінювання, що визначають за рівнянням:

$$\alpha E_b = \alpha_m E_{b,m} + \alpha_p E_{b,p}, \quad (4.23)$$

α – інтегральний за спектром коефіцієнт поглинання:

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_p, \quad (4.24)$$

β – інтегральний за спектром коефіцієнт розсіювання:

$$\beta = \beta_m + \beta_p, \quad (4.25)$$

У рівняннях (4.22) – (4.25) використовувані величини мають такі позначення:

- α_m , α_p – коефіцієнти поглинання відповідно до газового середовища й часток;
- β_m , β_p – коефіцієнти розсіювання відповідно до газового середовища й часток;
- $E_{b,m}$, $E_{b,p}$ – рівноважна щільність енергії випромінювання для газової фази та фази часток розсіювання відповідно до газового середовища й часток.

Перераховані величини визначають за формулами:

$$E_{b,m} = \sigma T_m^4, \quad (4.26)$$

$$\alpha_p E_{b,p} = \frac{1}{\Omega_{cell}} \sigma \varepsilon_p \sum_j \pi r_j^2 N_j T_{pj}^4, \quad (4.27)$$

$$\alpha_p = \frac{1}{\Omega_{cell}} \varepsilon_p \sum_j \pi r_j^2 N_j, \quad (4.28)$$

$$\beta_p = \frac{1}{\Omega_{cell}} (2 - \varepsilon_p) \sum_j \pi r_j^2 N_j, \quad (4.29)$$

де σ – стала Стефана – Больцмана; T_{pj} – температура j – тої частки; N_j – кількість часток у комірці; ε_p – ступінь чорноти часток.

Вихідний член в рівнянні (4.1) визначають за рівністю:

$$Q_{rad} = -4\pi n^2 (E_b - E_r), \quad (4.30)$$

де n – коефіцієнт заломлення середовища.

Базові рівняння системи Нав'є – Стокса для моделі теплообміну можна записати в такому узагальненому вигляді:

– рівняння дифузного типу:

$$\frac{\partial}{\partial t}(TS \cdot f) = \frac{1}{PS} \nabla(DS \cdot \nabla f) + SST, \quad (4.31)$$

– рівняння дифузно-конвекційного типу:

$$\frac{\partial}{\partial t}(TS \cdot f) + \nabla(CC \cdot Vf) = \frac{1}{PC} \nabla(DC \cdot \nabla f) + SST, \quad (4.32)$$

де узагальнені величини TC (Time Coefficient), CC (Convective Coefficient), PC (Prediffusion Coefficient) і DC (Diffusion Coefficient) визначають коефіцієнти рівняння за відповідних похідних, а величина SST (Scalar Source Term) задає вихідний член.

Для інтеграції узагальнених рівнянь (4.31) і (4.32), їх апроксимують для області, що дискретизує, за допомогою адаптивної локально подрібненої сітки. Апроксимовані для дискретної області узагальнені рівняння в ході реалізації неявної розрахункової схеми мають вигляд:

$$\frac{(TC \cdot f)^{n+1} - (TC \cdot f)^n}{\tau} = \frac{1}{TC} \nabla_h (DC \cdot \nabla_h f^{n+1}) + SST, \quad (4.33)$$

$$\frac{(TC \cdot f)^{n+1} - (TC \cdot f)^n}{\tau} \nabla^{(k,s)} (CC \cdot VF^{n+1}) = \frac{1}{PC} \nabla_h (DC \cdot \nabla_h f^{n+1}) + SST. \quad (4.34)$$

де t – часовий крок; $TC \cdot f$ – різницева апроксимація конвективного оператора, при цьому $k = 1$ (1-й порядок точності), а $s = 0$ (невраховане перенесення через ребра й вершини осередку); $\nabla_h (DC \cdot \nabla_h f^{n+1})$ – різницева апроксимація дифузійного оператора.

При використанні LES у якості моделі згорання зазвичай використовується модель частки в суміші (mixture fraction). «Частка в суміші» у даному змісті – скалярна величина, що являє собою масову частку одного або більше компонентів газу в даній точці потоку. За замовчуванням розраховуються два компонента суміші: масова частка неспаленого палива і масова частка спаленого палива (тобто продуктів згорання).

Променистий теплообмін залучається у модель за допомогою розв’язання рівняння переносу випромінювання для сірого газу і для деяких обмежених випадків з використанням широкодіапазонної моделі. Рівняння вирішується за допомогою метода аналогічного методу кінцевих об’ємів для конвективного переносу. Коефіцієнти поглинання сажею і димом обчислюються за допомогою вузькополюсної моделі RADCAL. Коефіцієнти поглинання і розсіювання засновані на теорії Мі.

Вибір сценарію пожежі розроблено експертним шляхом, на основі аналізу пожежної небезпеки об’єкту та об’ємно-планувальних рішень. Для проведення

моделювання визначаємо найбільш небезпечний у разі виникнення пожежі на території ТРЦ сценарій пожежі. Відповідно даних та вивчивши конструктивні

В сценарії пожежі прийнято, що пожежа має кругову форму розвитку і розповсюджується до максимальної площі в об'ємі -1 поверху. Для аналізу динаміки розвитку пожежі використовувалась модель, що розраховувалась протягом 600 секунд (10 хв). Однак, подальше моделювання було припинено внаслідок завершення процесу евакуації.

В розрахунку розглядається основний тип пожежної навантаги «Упаковка: верхній одяг, тканини (нейлон + вовна)» з такими параметрами:

- максимальна температура горіння – 1237°C ;
- нижня теплота згоряння – $23,30 \text{ МДж/кг}$;
- лінійна швидкість полум'я – $0,0835 \text{ м/с}$;
- питома швидкість вигорання – $0,0130 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}$;
- втрата кисню (O_2) – $-3,698 \text{ кг/кг}$;

Виділення газу:

- двоокис вуглецю (CO_2) – $0,4670 \text{ кг/кг}$;
- оксид вуглецю (CO) або чадний газ – $0,0145 \text{ кг/кг}$;
- хлористий водень (HCL) – $0,0000 \text{ кг/кг}$;
- димоутворювальна здатність – $129 \text{ Нп} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$.

За відсутності вихідних даних, пожежна навантага приймалась рівномірно розподіленою по підлозі приміщення розрахункової пожежі.

Прийнято, що при виникненні пожежі дим та інші небезпечні чинники пожежі розповсюджуються під стелею поверхів, формуючи димовий шар та опускаються, блокуючи евакуаційні виходи.

На рис. 4.15 наведено розрахункову модель яка відтворює геометричні розміри та особливості даного об'єкту і є ідентичною до його реальних розмірів.

Для контролю параметрів газового середовища біля входів на сходові клітки та евакуаційних виходах на висоті 1,7 м використовувались як точкові вимірювачі в газовій фазі (датчики), так і поля розподілу фізичних величин на

горизонтальному зрізі середовища (Slice). Кожен вимірювач являє собою контрольну точку фіксації даних небезпечних чинників пожежі, а саме температури, видимості, теплового потку, концентрації кисню, монооксиду вуглецю (CO) та діоксиду вуглецю (CO₂).

Візуалізація динаміки розповсюдження пожежі, диму, розподілу видимості за допомогою геометричної моделі і поля розподілу фізичних величин на горизонтальному зрізі середовища (Slice) наведено на рис. 4.16–4.18.

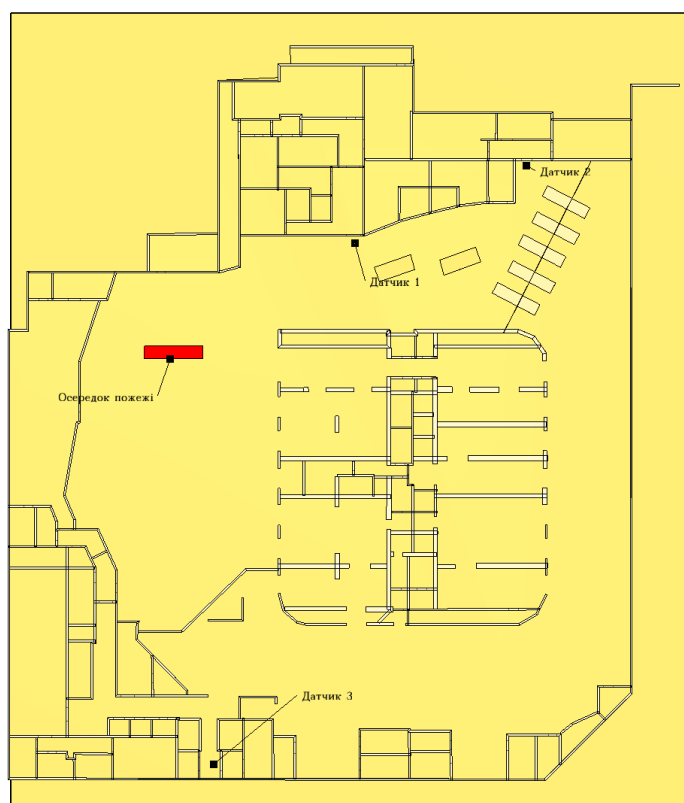


Рисунок 4.15 – Розрахункова модель з розташуванням вимірювачів та місця пожежі

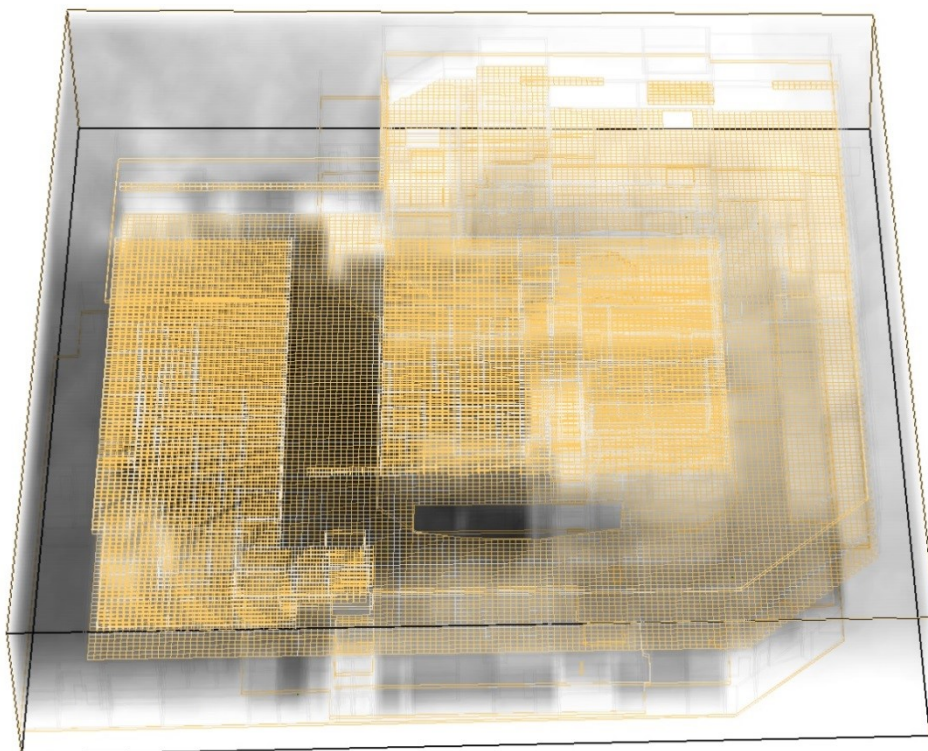


Рисунок 4.16 – Динаміка розповсюдження диму в в об'ємі -1 поверху

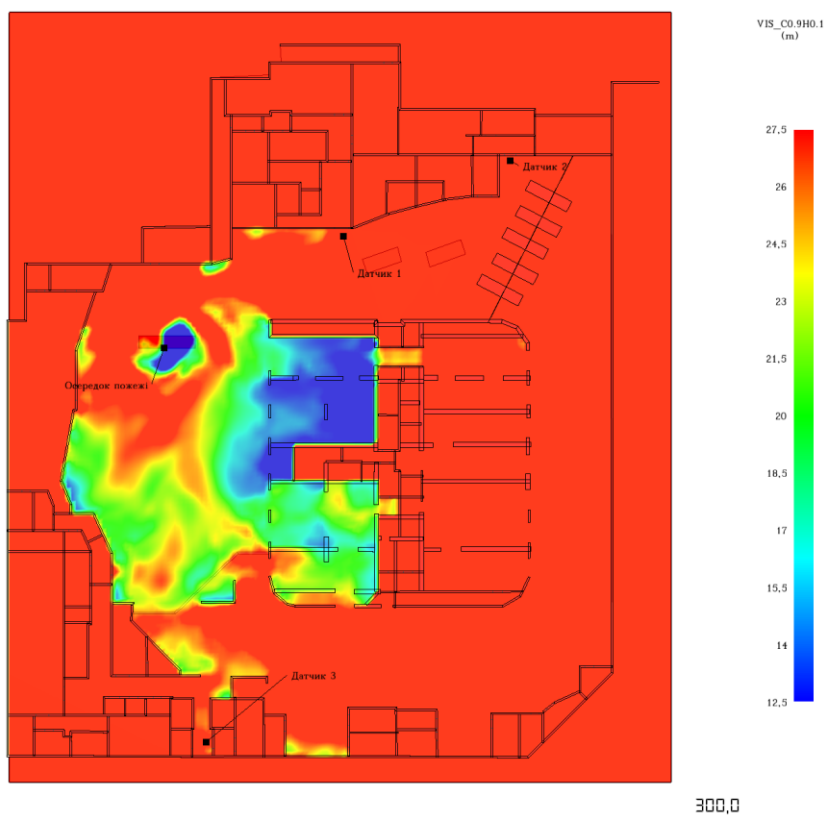


Рисунок 4.17 – Горизонтальний розподіл видимості на висоті 1,7 м на 300-й секунді пожежі

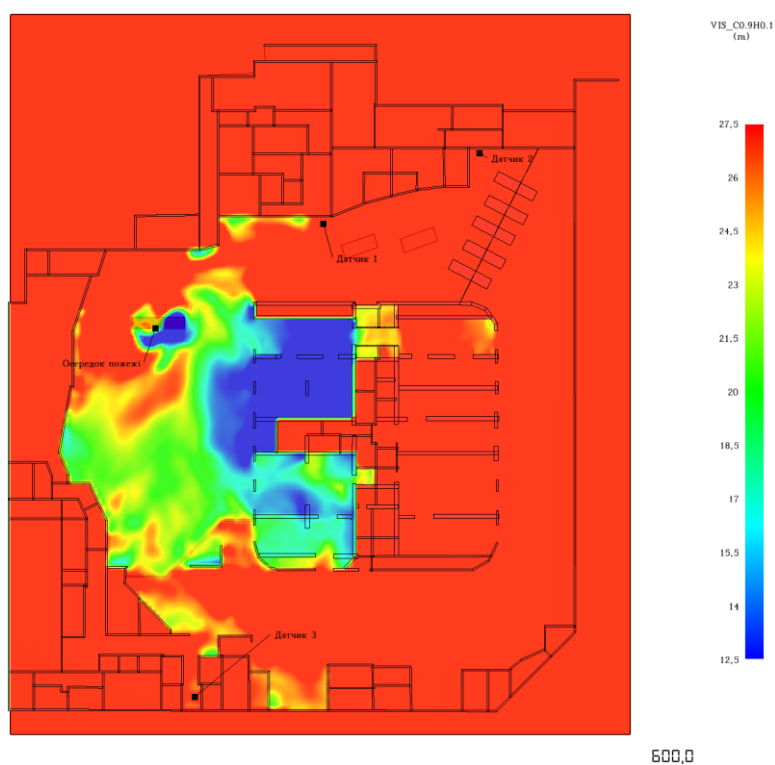


Рисунок 4.18 – Горизонтальний розподіл видимості на висоті 1,7 м на 300-й секунді пожежі

На рис. 4.19–4.24 зображено через який час від початку пожежі досягається гранично допустима концентрація (ГДК) по кожному з небезпечних чинників пожежі на точкових вимірювачах.

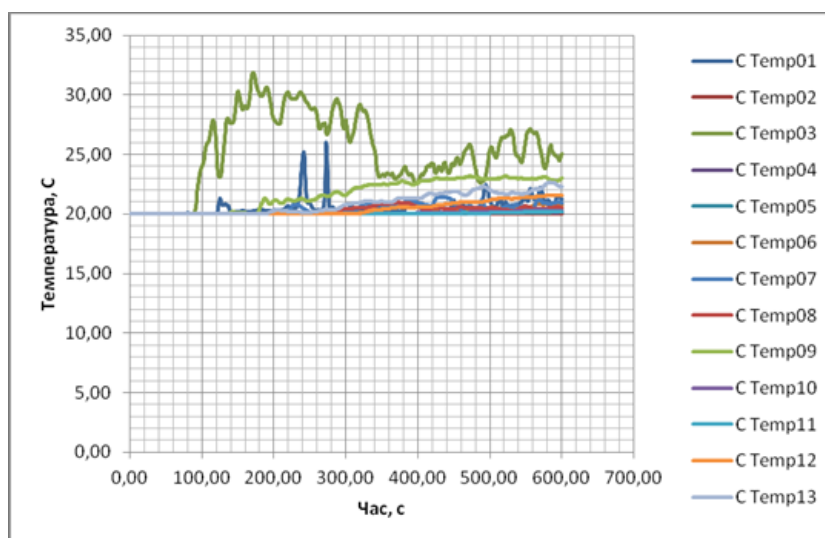


Рисунок 4.19 – Значення точкових вимірювачів температури

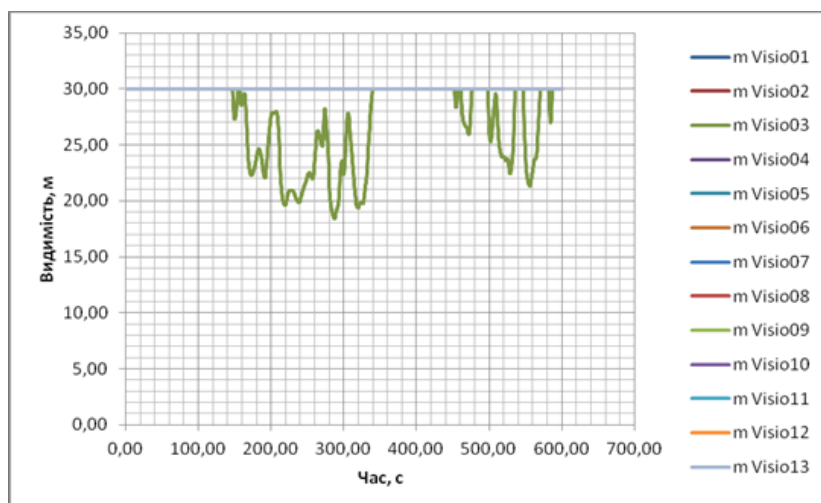


Рисунок 4.20 – Значення точкових вимірювачів втрати видимості

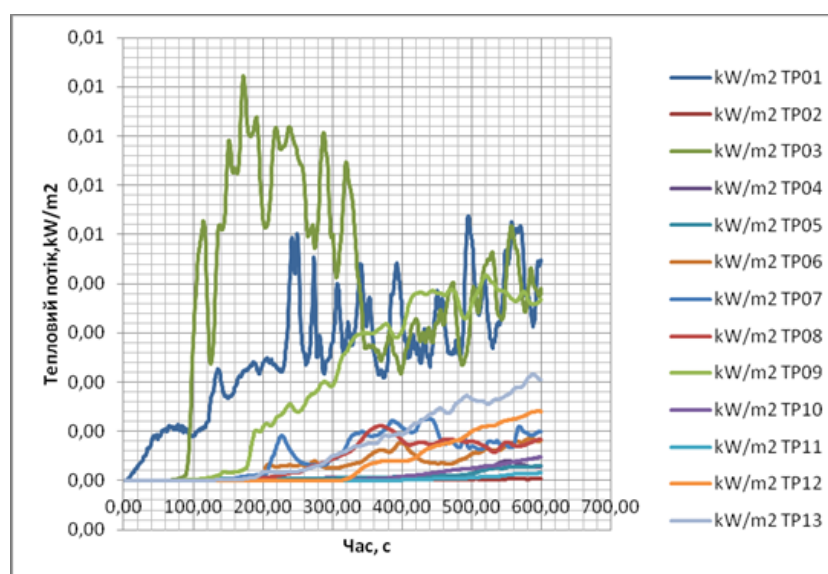


Рисунок 4.21 – Значення точкових вимірювачів теплового потоку

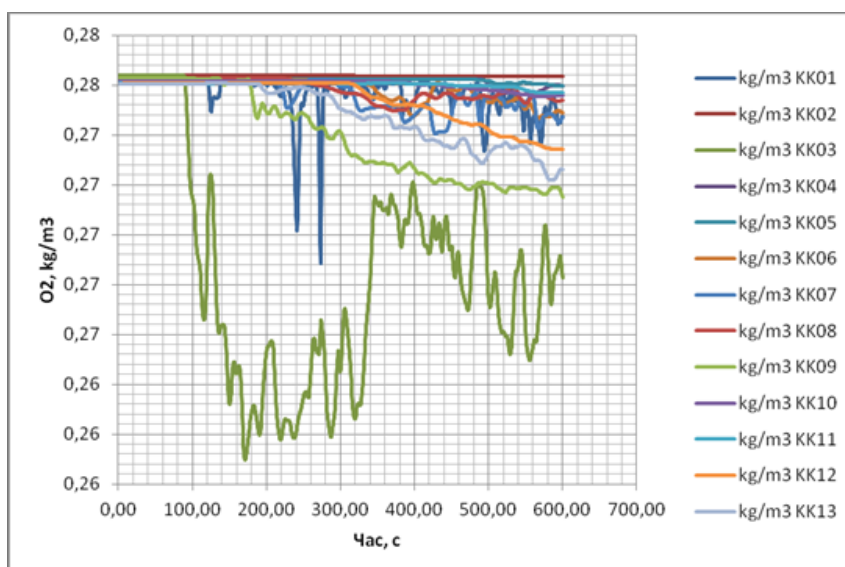


Рисунок 4.22 – Значення точкових вимірювачів концентрації кисню

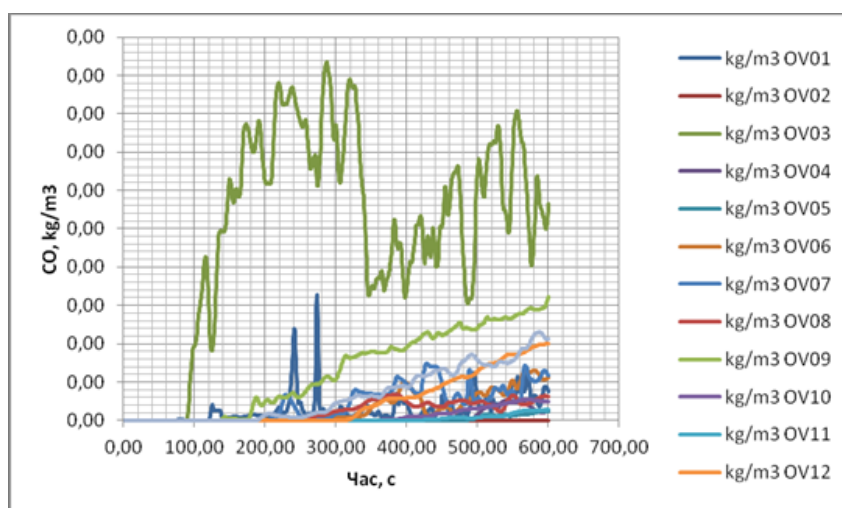


Рисунок 4.23 – Значення точкових вимірювачів концентрації СО

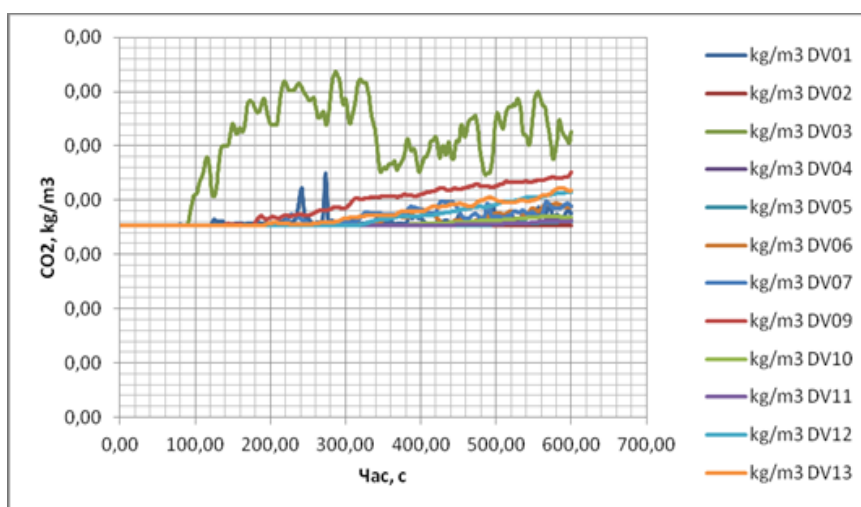


Рисунок 4.24 – Значення точкових вимірювачів концентрації CO_2

Результати розрахунків необхідного та фактичного (розрахункового) часу евакуації наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Результати розрахунків часу евакуації людей при пожежі та часу настання небезпечних чинників пожежі (необхідного часу евакуації людей)

Місце пожежі / поверх	Необхідний час евакуації, хв.	Розрахунковий час евакуації людей, хв.*	Виконання умов безпечної евакуації
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
-1-й поверх (до виходу 1)	>10,00	5,11	Виконується
-1-й поверх (до виходу 2)	>10,00	9,7	Виконується
-1-й поверх (до виходу 3)	4,9	4,7	Виконується
1-й поверх (до виходу 4)	>10,00	8,7	Виконується
1-й поверх(до виходу 5)	>10,00	8,06	Виконується
1-й поверх (до виходу 6)	6,76	3,08	Виконується
1-й поверх (до виходу 7)	>10,00	8,43	Виконується
1-й поверх (до виходу 8)	>10,00	2,25	Виконується
1-й поверх антресоль (до сходової клітки 1)	>10,00	2,06	Виконується
2-й поверх (до сходової клітки 1)	9,00	5,46	Виконується
2-й поверх (до сходової клітки 2)	7,6	6,91	Виконується
2-й поверх (до сходової клітки 3)	7,0	6,28	Виконується
2-й поверх антресоль	>10,00	5,25	Виконується
5-й поверх евакуація людей з нежитлових приміщень	>10,00	2,83	Виконується

Результати розрахунків необхідного часу евакуації з зони перебування людей визначені по мінімальних значеннях критичного часу досягнення

гранично допустимих значень для людини небезпечних чинників пожежі, а розрахунковий час евакуації прийнято по результатам розрахунків часу евакуації людей у межах поверхів ТРЦ з врахуванням часу початку евакуації [5].

4.3. Висновки за розділом

На основі отриманих у розділі 3 результатів визначено вихідні дані для розрахунку тривалості евакуації з будівлі ТРЦ.

Для розробленої розрахункової схеми евакуації виконано розрахунок тривалості евакуації із застосуванням індивідуально-потокової моделі. Моделювання процесу евакуації із ТРЦ виконано за допомогою програмного комплексу Pathfinder.

За результатами розрахунку визначено, що розрахунковий час евакуації людей від найвіддаленішої точки поверху до виходу з неї складає 587 с (9,7 хв) з урахуванням часу початку евакуації згідно з таблицею А.3 [5]. Наступним етапом моделювання буде розрахунок тривалості настання небезпечних чинників пожежі та порівняння їх результатів із фактичним часом евакуації.

Із використанням програмного продукту FDS, реалізованого на основі польової моделі, виконано моделювання поширення НЧП в будівлі закладу середньої освіти з інклюзивним навчанням та встановлено мінімальні значення часу, необхідні для блокування НЧП евакуаційних шляхів і виходів.

Загальні результатами розрахунків часу евакуації людей з ТРЦ у разі пожежі назовні показують, що розрахунковий час евакуації не перевищує необхідний, тобто люди встигають вийти до моменту досягнення небезпечними чинниками пожежі критичних для людини значень.

Розрахунки демонструють, що присутність маломобільних осіб у загальному потоці суттєво знижує швидкість евакуації. Це зумовлено тим, що маломобільні особи потребують значно більше часу на переміщення, що відповідно призводить до збільшення загальної тривалості евакуації.

Незважаючи на те, що додаткові заходи, такі як поліпшення інфраструктури, спеціальні евакуаційні засоби та підвищення рівня підготовки персоналу, можуть допомогти зменшити час евакуації, відсоток маломобільних осіб все одно буде мати значний вплив на швидкість руху потоку. Таким чином, при розробці та плануванні евакуаційних стратегій необхідно обов'язково враховувати відсоткове співвідношення маломобільних осіб у загальному потоці, щоб забезпечити ефективну та безпечну евакуацію для всіх груп населення.

РОЗДІЛ 5 АПРОБАЦІЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Ефективність евакуації в умовах надзвичайних ситуацій, зокрема пожежа в ТРЦ, значною мірою залежить від готовності персоналу та відвідувачів до швидкого та безпечного залишення приміщень. Особливу увагу необхідно приділяти евакуації маломобільних груп населення, які потребують більше часу на переміщення і можуть суттєво вплинути на загальну тривалість евакуації. Проведення навчальних евакуацій є критично важливим заходом, який дозволяє підвищити ефективність евакуаційного процесу, забезпечити належну підготовку персоналу та відвідувачів, а також виявити та усунути потенційні проблеми, пов'язані з евакуацією маломобільних осіб.

5.1 Рішення по мінімізації початкового часу евакуації з будівлі торговельно-розважального центру

Мінімізація початкового часу евакуації з будівлі ТРЦ є критичним аспектом забезпечення безпеки відвідувачів у випадку надзвичайних ситуацій, таких як пожежа. Початковий час евакуації включає період від моменту виникнення небезпеки до початку фактичного руху людей у напрямку виходів. Ефективні заходи для зменшення цього часу можуть значно підвищити загальну швидкість евакуації та зменшити ризик травм чи загибелі людей.

Одним із ключових рішень є покращення системи оповіщення. Важливо, щоб система оповіщення була багаторівневою і включала аудіо та візуальні сигнали, які можуть бути швидко помічені і зрозумілі всім відвідувачам, включаючи людей з обмеженими можливостями. Оповіщення повинно автоматично активуватися при виявленні пожежі або іншої надзвичайної ситуації, забезпечуючи негайне інформування всіх присутніх про необхідність евакуації.

Ще одним важливим аспектом є розміщення і доступність евакуаційних виходів. Вони повинні бути чітко позначені і завжди вільні від перешкод.

Розробка і впровадження планів евакуації, які враховують розташування всіх відвідувачів у будівлі, зокрема маломобільних груп, є важливою складовою цього процесу. Важливо також забезпечити, щоб евакуаційні шляхи були широкими і добре освітленими, що дозволить уникнути заторів і паніки.

Тренування персоналу ТРЦ є ще одним важливим заходом. Регулярні навчання і симуляції евакуації допоможуть співробітникам діяти швидко і ефективно в разі реальної загрози. Персонал повинен знати свої обов'язки і ролі під час евакуації, а також бути в змозі надати допомогу відвідувачам, особливо маломобільним особам.

Інформаційні кампанії серед відвідувачів також можуть сприяти мінімізації початкового часу евакуації. Розміщення інструкцій з евакуації в легкодоступних місцях, таких як інформаційні стенди і цифрові дисплеї, допоможе відвідувачам бути обізнаними про те, як діяти у випадку надзвичайної ситуації.

Використання сучасних технологій, таких як системи моніторингу і управління натовпом, може значно покращити ефективність евакуації. Такі системи можуть відстежувати кількість людей у різних частинах будівлі і автоматично коригувати маршрути евакуації для уникнення заторів.

Таким чином, комплексний підхід до мінімізації початкового часу евакуації включає покращення систем оповіщення, забезпечення доступності і ефективності евакуаційних виходів, регулярні тренування персоналу, інформування відвідувачів та використання сучасних технологій. Впровадження цих заходів сприятиме швидшій і безпечнішій евакуації з будівлі ТРЦ у разі надзвичайної ситуації, зокрема пожежі, що в кінцевому рахунку підвищить рівень безпеки для всіх відвідувачів.

5.2 Обґрунтування ефективності регулярного проведення навчань з евакуації відвідувачів ТРЦ для мінімізації тривалості початкового етапу евакуації

Ефективність регулярного проведення навчань з евакуації відвідувачів ТРЦ є важливим аспектом забезпечення безпеки та мінімізації тривалості початкового етапу евакуації. Такі навчання дозволяють покращити готовність як персоналу, так і відвідувачів до дій у надзвичайних ситуаціях, зокрема під час пожежі. Розглянемо ключові аспекти, які підкреслюють необхідність та ефективність таких заходів.

По-перше, регулярні навчання з евакуації дозволяють відпрацювати взаємодію між різними групами осіб, що перебувають у ТРЦ, включаючи маломобільні групи населення. Участь у таких навчаннях допомагає ідентифікувати та усувати потенційні проблеми, які можуть виникнути під час реальної евакуації. Це особливо важливо для маломобільних осіб, які потребують додаткової допомоги та спеціальних умов для безпечної евакуації.

По-друге, навчання сприяють підвищенню обізнаності відвідувачів щодо маршрутів евакуації та дій у разі надзвичайної ситуації. Відвідувачі, які беруть участь у навчаннях, набувають необхідних знань та навичок, що допомагають їм діяти спокійно та впевнено під час евакуації. Це дозволяє зменшити паніку та хаос, що, у свою чергу, скорочує час початкового етапу евакуації.

По-третє, персонал ТРЦ, залучений до навчань, отримує практичний досвід у керуванні процесом евакуації. Вони набувають навичок швидкого реагування на надзвичайні ситуації, координації дій з іншими працівниками та надання допомоги відвідувачам, зокрема маломобільним групам. Це підвищує загальну ефективність евакуації та забезпечує більш оперативний і організований вихід з будівлі.

По-четверте, проведення навчань дозволяє перевірити функціональність систем оповіщення та евакуаційного обладнання. Виявлення та усунення недоліків у роботі цих систем у ході навчань допомагає забезпечити їхню

безвідмовну роботу у реальній ситуації. Це включає як аудіовізуальні системи оповіщення, так і засоби для евакуації маломобільних осіб.

По-п'яте, регулярні навчання створюють можливість для аналізу та вдосконалення планів евакуації. Після кожного тренування можна провести детальний аналіз дій усіх учасників, виявити слабкі місця та внести необхідні корективи до планів евакуації. Це дозволяє постійно вдосконалювати підходи до забезпечення безпеки та підвищувати готовність до можливих надзвичайних ситуацій.

Отже, регулярне проведення навчань з евакуації відвідувачів ТРЦ є необхідним заходом для мінімізації тривалості початкового етапу евакуації та підвищення ефективності евакуаційного процесу в умовах наявності маломобільних груп населення. Це дозволяє забезпечити безпеку усіх відвідувачів, знизити ризики та підвищити загальний рівень готовності до надзвичайних ситуацій.

5.3 Рекомендації проведення навчальних евакуацій з торговельно-розважального центру для підвищення ефективності евакуаційного процесу в умовах наявності маломобільних груп населення

Рекомендації для підвищення ефективності евакуацій з ТРЦ, зокрема у випадках, коли присутні маломобільні групи населення, включають кілька ключових аспектів. По-перше, важливо розробляти індивідуалізовані плани евакуації для цих груп, що включають точне призначення відповідальних осіб та визначення оптимальних маршрутів виходу. Другим аспектом є проведення регулярних навчань і тренувань з усіма працівниками ТРЦ з метою навчання правильним процедурам евакуації, з особливим акцентом на взаємодію з маломобільними особами.

Крім того, важливо розробити адаптовані маршрути евакуації, що враховують фізичні обмеження цих осіб та забезпечують їм швидкий та безпечний вихід із будівлі. Необхідно забезпечити ефективну систему комунікації з маломобільними особами під час евакуації, що може включати

використання спеціалізованих систем сповіщень або попереднє розташування співробітників для допомоги. Нарешті, важливим є постійна оцінка і оновлення планів евакуації з урахуванням індивідуальних потреб маломобільних груп і нових можливостей для покращення ефективності системи евакуації в умовах ТРЦ.

1. Підготовчий етап.

1.1. Аналіз планів евакуації ТРЦ.

Вивчення існуючих евакуаційних планів і визначення основних етапів евакуації.

1.2. Оцінка потреб відвідувачів, що належать до маломобільних груп.

Аналіз характеристик маломобільних груп, їх рухливості та особливостей евакуації.

2. Розробка та планування навчальної евакуації.

2.1. Визначення цілей та завдань.

Встановлення основних цілей навчальної евакуації та формулювання конкретних завдань для учасників.

2.2. Обрання сценарію навчання.

Вибір типових сценаріїв пожежі та інших надзвичайних ситуацій для проведення евакуаційної вправи.

3. Підготовка учасників та персоналу ТРЦ.

3.1. Теоретичне навчання.

Проведення брифінгів та навчальних сесій для учасників щодо дій під час пожежі та евакуації, з особливим акцентом на потреби маломобільних осіб.

3.2. Практичні вправи.

Організація тренувальних сеансів з використанням спеціальних засобів евакуації для маломобільних груп.

4. Проведення евакуаційної вправи.

4.1. Мобілізація учасників.

Проведення сигналу про пожежу та активізація процедур евакуації.

4.2. Координація дій.

Спостереження за діями учасників та персоналу ТРЦ, забезпечення правильного напрямку руху.

5. Оцінка результатів та аналіз.

5.1. Аналіз ефективності.

Оцінка часу евакуації, поведінки учасників та персоналу, виявлення можливих проблемних ситуацій.

5.2. Підготовка звіту.

Складання документованого звіту з проведення евакуаційної вправи та рекомендацій щодо подальшого вдосконалення евакуаційних планів.

6. Коригування та підвищення ефективності.

6.1. Впровадження заходів.

Використання отриманих результатів для удосконалення евакуаційних планів та підвищення рівня безпеки у ТРЦ.

6.2. Навчання персоналу.

Проведення навчальних семінарів для персоналу ТРЦ з питань ефективної організації евакуації, зокрема з урахуванням потреб маломобільних груп населення.

6.3. Регулярні вправи та перевірки.

Проведення періодичних навчальних евакуацій для перевірки готовності персоналу та учасників до дій у надзвичайних ситуаціях.

6.4. Аналіз інцидентів та інцидентного впливу.

Вивчення та аналіз подій, що сталися під час евакуації, з метою виявлення слабких місць та розробки заходів для їх виправлення.

6.5. Підвищення обізнаності громадськості.

Проведення інформаційних кампаній серед відвідувачів ТРЦ щодо процедур евакуації та правил безпеки.

6.6. Співпраця з експертами та органами державного контролю.

Залучення спеціалістів з пожежної безпеки та представників органів державного нагляду для оцінки та рекомендацій з покращення безпеки в ТРЦ.

6.7. Залучення науково-дослідних установ.

Встановлення співпраці з науково-дослідними установами для створення емпіричних баз даних щодо процесу евакуації та аналізу його характеристик. Залучення фахівців з цих установ для проведення наукових досліджень щодо оптимізації процесу евакуації та подальшого вдосконалення методів безпеки в ТРЦ.

6.8. Навчання та підготовка пожежно-рятувальних підрозділів.

Проведення навчальних заходів серед працівників пожежно-рятувальних підрозділів з акцентом на ефективні методи та техніки евакуації маломобільних груп населення з приміщень ТРЦ.

Практичне відпрацювання сценаріїв евакуації, включаючи врятування та допомогу особам з обмеженими можливостями, з метою підвищення навичок та координації дій під час надзвичайних ситуацій.

Практичні поради для організації навчань з евакуації, спрямованих на підвищення ефективності процесу рятування маломобільних груп населення з приміщень ТРЦ:

1. Аналізуйте структуру відвдувачів: Вивчіть характеристики маломобільних груп населення, які можуть бути присутні в ТРЦ. Це можуть бути люди з обмеженими можливостями, літні люди або батьки з дітьми.

2. Розробіть індивідуалізовані сценарії: Створіть сценарії евакуації, які враховують потреби маломобільних груп. Приділіть увагу різним сценаріям евакуації в залежності від типу надзвичайної ситуації та місцевих умов.

3. Проводьте практичні навчання: Організуйте регулярні практичні навчання з рятування, які включають симуляції евакуації для маломобільних груп. Використовуйте реалістичні сценарії та обладнання для підвищення ефективності навчання.

4. Залучення співробітників ДСНС, фахівців із медичного та соціального супроводу: Запрошуйте спеціалістів з ДСНС, медичного супроводу та соціальних послуг для надання консультацій та допомоги під час навчання.

5. Оцінюйте та вдосконалюйте процес після кожного навчання: Проводьте оцінку ефективності та збирайте відгуки від учасників. Використовуйте ці відомості для вдосконалення процесу навчання.

6. Постійне навчання персоналу: Забезпечте постійне навчання персоналу ТРЦ з питань евакуації та рятування, зокрема з фокусом на роботу з маломобільними групами.

7. Створіть інструкції та посібники: Розробіть докладні інструкції та посібники щодо процедур евакуації для маломобільних груп, які будуть доступні для персоналу та відвідувачів ТРЦ.

8. Проводьте регулярні навчальні сесії: Не обмежуйтеся одноразовими тренуваннями. Проводьте регулярні навчальні сесії з персоналом та відвідувачами для підтримання навичок та свідомості щодо евакуації.

Ця методика надасть можливість ефективно підготувати персонал та учасників до дій у разі виникнення надзвичайних ситуацій та покращить загальний рівень безпеки в ТРЦ.

5.4 Висновки за розділом

Дослідження показують, що для мінімізації початкового часу евакуації з ТРЦ необхідно впроваджувати комплексні заходи, спрямовані на вдосконалення організації та планування евакуаційного процесу. Одним із ключових рішень є оптимізація евакуаційних маршрутів та використання сучасних автоматизованих систем оповіщення, які забезпечують своєчасне інформування відвідувачів про необхідність негайної евакуації. Крім того, важливим аспектом є забезпечення достатньої кількості та ширини евакуаційних виходів, що дозволяє уникнути заторів і забезпечити безперешкодний рух потоку людей.

Впровадження регулярних навчань з евакуації є ефективним засобом підвищення готовності відвідувачів та персоналу до надзвичайних ситуацій. Навчання дозволяють учасникам набувати практичних навичок і знань, необхідних для швидкого та скоординованого виконання евакуаційних заходів.

Особлива увага під час навчань повинна приділятися маломобільним групам населення, оскільки їхня присутність значно впливає на швидкість евакуації. Залучення маломобільних осіб до навчань дозволяє виявити та усунути можливі проблеми, що можуть виникнути під час їхньої евакуації, а також розробити індивідуальні плани евакуації для цієї категорії відвідувачів.

Рекомендації щодо проведення навчальних евакуацій з ТРЦ для підвищення ефективності евакуаційного процесу в умовах наявності маломобільних груп населення включають наступні ключові аспекти. По-перше, навчання повинні проводитися регулярно, не менше двох разів на рік, з участю всіх категорій відвідувачів та персоналу. По-друге, необхідно забезпечити детальне інформування всіх учасників про плани евакуації, маршрути та правила поведінки у надзвичайних ситуаціях. По-третє, слід враховувати особливі потреби маломобільних осіб, розробляти для них індивідуальні плани евакуації та забезпечувати наявність спеціалізованих засобів для їхнього переміщення. По-четверте, важливо забезпечити координацію з представниками екстрених служб для ефективної взаємодії у разі реальної надзвичайної ситуації. По-п'яте, після кожного навчання необхідно проводити детальний аналіз дій усіх учасників, виявляти недоліки та вносити корективи до планів евакуації.

Таким чином, впровадження регулярних навчань з евакуації сприяє підвищенню готовності ТРЦ до надзвичайних ситуацій, забезпечує безпеку відвідувачів та персоналу, а також мінімізує початковий час евакуації, що є критичним фактором у збереженні життя та здоров'я людей.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, яка є завершеним науковим дослідженням, наведено розв'язання актуальної наукової задачі розкриття закономірностей руху людського потоку в ТРЦ, що складається з людей різних груп мобільності від щільності та відсоткового співвідношення людей маломобільних груп, що є обґрунтованою теоретичною базою та створює передумови для удосконалення розрахункового методу визначення часу евакуації людей із приміщень будівель і споруд під час пожежі за допомогою спрощеної аналітичної моделі:

1. Проаналізовано сучасний стан пожежної безпеки в ТРЦ, що підкреслює їхню важливість у контексті сучасного суспільства. Встановлено, що оптимальний вибір систем протипожежного захисту безпосередньо впливає на рівень пожежної безпеки, особливо з огляду на специфіку планування ТРЦ, які характеризуються великою відвідуваністю та складними архітектурними рішеннями.

Аналіз виявив, що проведення експериментальних досліджень щодо евакуації людей різних груп мобільності є важливим завданням, яке дозволить створити емпіричну базу для вдосконалення систем евакуації. Комп'ютерне моделювання експериментальних досліджень евакуації різних груп мобільності дозволить краще зрозуміти вплив щільності людського потоку на швидкість евакуації, що, у свою чергу, сприятиме удосконаленню методик визначення розрахункового часу евакуації.

Необхідність проведення натурних спостережень у реальних умовах ТРЦ стане основою для формулювання рекомендацій щодо проведення навчальних евакуацій, що дозволить підвищити ефективність евакуаційного процесу.

2. Розроблено методику експериментальних досліджень евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності М1, М3 та М4. Представлена методика дала змогу створити емпіричні табличні дані щодо параметрів руху змішаних евакуаційних потоків, а саме встановити залежності між швидкістю руху учасників евакуації та щільності потоку. Отримані дані були використані в

дослідженнях евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності і дозволили встановити залежності швидкості руху від щільності для кожної конфігурації потоку та виведення коефіцієнта адаптації людського потоку до зміни його щільності під час руху з різним відсотковим співвідношенням учасників груп мобільності M1, M3 та M4.

3. За результатами проведених експериментальних досліджень руху змішаного потоку людей з різними параметрами мобільності (M1, M3, M4) встановлено значний вплив цих параметрів на динаміку евакуаційного процесу. У випадку з параметрами M1 (90 %), M3 (3,33 %) та M4 (6,67 %) зафіксовано середнє відсоткове зниження швидкості потоку на рівні 54,86 %, при одночасному збільшенні середньої щільності потоку на 42,38 %. Середнє значення швидкості потоку становить приблизно 38,28 м/хв. Середнє значення щільності потоку становить приблизно $0,38 \text{ м}^2/\text{м}^2$. Медіана близька до середнього значення, що свідчить на відносно симетричний розподіл щільності потоку.

4. Для параметрів M1 (90 %), M3 (6,67 %) та M4 (3,33 %) виявлено менше відсоткове зниження швидкості потоку – 32,66 %, з відповідним збільшенням щільності потоку на 39,63 %. Середнє значення швидкості потоку становить приблизно 51,10 м/хв. Середнє значення щільності потоку становить приблизно $0,34 \text{ м}^2/\text{м}^2$. У разі M1 (93,33 %), M3 (3,335 %) та M4 (3,335 %) спостерігається середнє відсоткове зниження швидкості потоку на рівні 49,42 %, при середньому відсотковому збільшенні щільності потоку на 41,83 %. Середнє значення швидкості потоку становить приблизно 41,11 м/хв. Це середнє значення всіх даних швидкості потоку, що вказує на середній рівень швидкості в цій вибірці. Середнє значення щільності потоку становить приблизно $0,40 \text{ м}^2/\text{м}^2$. Отримані дані свідчать про необхідність ретельного врахування різноманітних факторів мобільності при розробці стратегій евакуації та управлінні безпекою в умовах масового руху людей.

5. Перевірено адекватність експериментальних даних шляхом порівняння їх з результатами комп'ютерного моделювання, що підвищує надійність отриманих результатів. Різниця між результатами моделювання та натурного експерименту

не перевищує суттєвих значень різниці в часі, що свідчить про адекватність побудованих моделей. Це, своєю чергою, дозволило оцінити правильність проведеного експерименту та розширити межі експериментальних досліджень щодо відтворення процесів евакуації людських потоків, включаючи маломобільні групи населення М1, М3 та М4, без залучення додаткових матеріальних і людських ресурсів та часу.

6. Встановлено залежність впливу щільності потоку (D), частки учасників, що користуються опорами (М3), та частки учасників, які пересуваються на візках (М4) на швидкість руху людського потоку. Залежність швидкості змішаного людського потоку від щільності та відсоткового співвідношення учасників груп мобільності М1, М3 та М4 має вигляд:

$$V_{\text{сер}} = 95,47131679 - 83,02423075D_{\text{сер}} - 2,751822156\alpha_{\text{М3}} - 4,64221358\alpha_{\text{М4}} + \\ + 1,576260255D_{\text{сер}}\alpha_{\text{М3}} + 3,63924295D_{\text{сер}}\alpha_{\text{М4}} + 0,529491833\alpha_{\text{М3}}\alpha_{\text{М4}} - \\ - 0,746254255D_{\text{сер}}\alpha_{\text{М3}}\alpha_{\text{М4}}$$

7. Встановлено, що результати, отримані в ході кожного окремого експериментального дослідження, є адекватними, оскільки їх відносні та середньоквадратичні відхилення від усереднених даних становлять 0,20 %; 3,26 %; 3,34%; 17,91 %, а критерії Фішера та Стьюдента не перевищують критичних значень.

8. На основі проведених досліджень поведінки людей з різними рівнями мобільності під час евакуації, а також ефективності та проблем рятування маломобільних груп (М4) пожежно-рятувальними підрозділами розроблено Рекомендації проведення навчальних евакуацій з ТРЦ спрямованих на підвищення ефективності евакуаційного процесу в умовах наявності маломобільних груп населення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Daily Lviv. На Львівщині є 13 будинків-інтернатів для людей похилого віку та осіб з інвалідністю, 2 з них – для дітей. URL: <https://dailylviv.com/news/medytsyna/na-lvivshchyni-ie-13-budynkiv-internativ-dlya-lyudei-pokhyloho-viku-ta-osib-z-invalidnistyu-2-z-nykh-dlya-ditei-95600> (дата звернення: 07 липня 2023).
2. Про схвалення Національної стратегії із створення безбар'єрного простору в Україні на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 14 квітня 2021 р. № 366-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/366-2021-p#Text> (дата звернення: 07 липня 2023).
3. Будинки і споруди. Інклюзивність будівель і споруд. Основні положення : ДБН В.2.2-40:2018 [Чинний від 2019-04-01]. Вид. офіц. Київ, 2018. 64 с.
4. Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. (2023). В Україні налічується 3 мільйони людей з інвалідністю. URL: <https://minre.gov.ua/2023/09/22/v-ukrayini-nalichuyetsya-3-miljony-lyudej-z-invalidnistyu> (дата звернення: 07 липня 2023).
5. Пожежна безпека. Загальні положення : ДСТУ 8828:2019. Зі Зміною № 1 [Чинний з 2020-01-01]. Київ : УкрНДНЦ, 2019. 87 с.
6. Павлюк Ю. Е., Шарий В. В., Снігур Б. В. Аналіз сучасного стану забезпечення пожежної безпеки в торговельно-розважальних закладах. Пожежна безпека Fire Safety. 2023. №43, 2023 С. 113-122. DOI: 10.32447/20786662.43.2023.13.
7. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва : ДБН В.1.1-7:2016 [Чинний від 2017-01-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2016. 49 с.
8. Будинки і споруди. Підприємства торгівлі : ДБН В.2.2-23:2009 [Чинний від 2010-07-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 102 с.

9. Громадські будинки та споруди. Основні положення : ДБН В.2.2-9:2018. Зі Зміною № 1 [Чинний від 2019-03-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2018. 126 с.
10. Системи протипожежного захисту : ДБН В.2.5-56:2014 [Чинний від 2015-01-01]. Київ: Мінрегіон України, 2014. 107 с.
11. Grootschalig brandweeroptreden 2016-2018, Instituut Fysieke Veiligheid, Brandweeracademie, URL: nipv.nl/wp-content/uploads/2023/01/20191211-BA-Grootschalig-brandweeroptreden-2016-2018.pdf (дата звернення: 07 липня 2024).
12. U.S. Structure Fires in Stores and Other Mercantile Properties, [2009, 2011, 2015] The National Fire Protection Association URL: library.nfpa.org/GeniePLUS/GeniePLUS/Portal/Public.aspx?lang=en-US&g_AAAJ=Mercantile&p_AAAK=AAAJ (дата звернення: 07 липня 2024).
13. Arif Mahmud Shuklo Shoshe, Ashiqur Rahman. Improvement of heat and smoke confinement using air curtains in informal shopping malls. Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 46. Article 103676. DOI: doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103676 (дата звернення: 07 липня 2024).
14. Інформація про виникнення пожежі у розважальному центрі Mi100 URL: zaxid.net/vnaslidok_pozhezhi_u_nichnomu_klubi_u_lvovi_postrazhdali_ponad_20_lyudey_n1410809 (дата звернення: 07 липня 2024).
15. Інформація про виникнення пожежі у розважальному центрі Forum Lviv URL: www.rbc.ua/rus/stylar/odnom-naibolshih-trts-ukrainy-sluchilsya-1579282871.html (дата звернення: 07 липня 2023).
16. Інформація про виникнення пожежі у торговому центрі Епіцентр URL: prm.ua/u-pervomaysku-velyka-pozhezha-u-tts-epitsen-tr-zatrymaly-pidpaliuvacha-foto-i-video/ (дата звернення: 24 жовтня 2023).
17. Інформація про виникнення пожежі у торговому центрі Нанкіна URL: www.breakinglatest.news/news/photo-nanjings-famous-shopping-mall-was-destroyed-by-fire-jinsheng-department-store-nanjing-famous-devoured/ (дата звернення: 24 жовтня 2023).

18. Про припинення заходів державного нагляду (контролю) і державного ринкового нагляду в умовах воєнного стану : Постанова Кабінету Міністрів України від 13.03.2022 р. №303 URL: zakon.rada.gov.ua/laws/show/303-2022-%D0%BF#Text (дата звернення: 07 липня 2024).

19. ДСТУ CEN/TS 54-14:2021. Видання. Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 14. Настанови щодо побудови, проектування, монтування, пусконаладжування, введення в експлуатацію, експлуатування та технічного обслуговування. [На заміну ДСТУ-Н CEN/TS 54-14:2009; чинний від 01.07.2021]. Вид. офіц. Київ, ДП "Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості", 2021. 184 с.

20. Кодекс України про адміністративні правопорушення, Редакція від 14.10.2023 URL: zakon.rada.gov.ua/laws/show/80731-10#n2047 (дата звернення: 07 липня 2024).

21. Khalid A.M. Moinuddin, Jasmine Innocent, Koroush Keshavarz. Reliability of sprinkler system in Australian shopping centres –A fault tree analysis. *Fire Safety Journal*. 2019. Volume 105, P. 204-215. DOI: doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.03.006 (дата звернення: 07 липня 2023).

22. Ning Wang, Ying Gao, Chao-ying Li, Wen-mei Gai. Integrated agent-based simulation and evacuation risk-assessment model for underground building fire: A case study. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 40. P/ 102609. DOI: doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102609.

23. Оношко І., Ковалишин В. Аналіз методології оцінювання пожежних ризиків. *Пожежна безпека*. 2022. Т. 41. С. 94–102. DOI: doi.org/10.32447/20786662.41.2022.11.

24. H. Derya Arslan, Hilal Ergener. Comparative analysis of shopping malls with different plans by using space syntax method. *Ain Shams Engineering Journal*. 2023. Vol. 14, Issue 9, Article 102063 DOI: doi.org/10.1016/j.asej.2022.102063.

25. Wenjun Lei, Zhanjiang Zheng, Chuanliang Rong, Chuanmin Tai, Shengzhong Zhao, Angui Li. Study on fire smoke control in evacuation passageways on the top floor of an atrium involving breathing zones combined with underfloor makeup

air supplementation. *Safety Science*. 2022. Vol. 153. 105807. DOI: doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105807.

26. Інформація про пожежу у торговому центрі Східної Європи URL: www.nfpa.org/News-and-Research/Publications-and-media/NFPA-Journal/2019/November-December-2019/News-and-Analysis/Dispatches/International (дата звернення: 07 липня 2024).

27. Di Huang, Guo-qing Zhu, Rong-liang Pan. Probabilistic Model of Smoke Filling in Large Spaces. *Procedia Engineering*. 2018. Vol. 211. P. 271-279. DOI: doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.013.

28. Arif Mahmud Shuklo Shoshe, Ashiqur Rahman. Air curtain in informal shopping malls: Optimization of the air curtain operating parameters for heat and smoke confinement. *Energy and Buildings*. 2022. Vol. 276. Article 112531. DOI: doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112531.

29. Di Huang, Guo-qing Zhu, Rong-liang Pan, Probabilistic Model of Smoke Filling in Large Spaces. *Procedia Engineering*. 2018. Vol. 211. P. 271-279. DOI: doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.013.

30. Fang Liu, Shengzhong Zhao, Miao Cheng Weng, Yongqiang Liu. Fire risk assessment for large-scale commercial buildings based on structure entropy weight method. *Safety Science*. 2017. Vol. 94. P. 26-40. DOI: doi.org/10.1016/j.ssci.2016.12.009.

31. W. Kathy Tannous. The economic cost of unwanted automatic fire alarms. *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 124. Article 103394. DOI: doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103394.

32. Gang Liu, Hongyong Yuan, Lida Huang. A fire alarm judgment method using multiple smoke alarms based on Bayesian estimation. *Fire Safety Journal*. 2023 Vol. 136. Article 103733. DOI: doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103733.

33. ДСНС України. Аналітична довідка про пожежі в Україні за 2023 рік. URL: <https://idundcz.dsns.gov.ua/upload/2/0/1/8/2/6/2/analitchna-dovidka-pro-pojeji-122023.pdf> (дата звернення: 02 липня 2023).

34. Системи протипожежного захисту : ДБН В.2.5-56:2014 [Чинний від 2015-07-01]. Вид. офіц. Київ, 2014. 94 с.
35. Графічні знаки безпеки. Кольори та знаки безпеки. Зареєстровані знаки безпеки : ДСТУ EN ISO 7010:2019 [Чинний від 2020-07-01]. Вид. офіц. Київ, 2020. 44 с.
36. Ковалишин В. В., Доценко О. Г., Хлевой О. В., Дивень В. І. Дослідження евакуації людей різних груп мобільності з торговельно-розважального центру. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 2 (14). С. 99–107. DOI: 10.33269/nvcz.2022.2(14).99-107.
37. Ковалишин В. В., Доценко О. Г., Хлевой О. В. Дослідження евакуації людей з обмеженою мобільністю із торговельно-розважального центру. *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: Всеукр. наук.-практ. конф., з міжнародною участю. м. Львів, 12-13 жовт. 2022. Львів, 2022. С. 43-46.*
38. Доценко О. Г., Дишкант О. В. Залежність евакуаційної швидкості руху людських потоків від перебування в них осіб, що пересуваються на кріслах колісних. *Innovations and prospects of world science: proceedings of XII International Scientific and Practical Conference. Vancouver, 20-22 лип., Vancouver, 2022. С. 114-117.*
39. Дишкант О. В., Дивень В.І., Доценко О. Г., Савченко О.В. Чинники, які впливають на швидкість евакуації. *Moderní aspekty vědy. Svazek XXII mezinárodní kolektivní monografie. Česká republika. 2022 С. 516-526.*
40. Доценко О. Г., Бабенко Д. М., Луценко Ю. В., Дивень В. І. Дослідження евакуації та рятування людей з обмеженою мобільністю із торговельного центру пожежно-рятувальними підрозділами. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: матеріали XII Всеукр. наук.-практ. конф., з міжнародною участю. м. Черкаси, 27-28 жовт. 2022. Черкаси, 2022. С. 21-23.*
41. P. Geoerg, J. Schumann, M. Boltes, M. Kinateder. How people with disabilities influence crowd dynamics of pedestrian movement through bottlenecks. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Article 14273. DOI: 10.1038/s41598-022-18142-7.

42. Y. You, R. Ye, Z. Fang, X. Ren, S. Xie, P. Huang, L. Yu, T. Yu, J. Yan. Evacuation dynamics of heterogeneous crowds involving individuals with different types of disabilities. *Safety Science*. 2023. Vol. 168. Article 106297. DOI: 10.1016/j.ssci.2023.106297.

43. L. Fu, H. Qin, Q. Shi, Y. Zhang, Y. Shi An experimental study on evacuation dynamics including individuals with simulated disabilities. *Safety Science*. 2022. Vol. 155. Article 105878. DOI: 10.1016/j.ssci.2022.105878.

44. Хлевной О. В., Харишин Д. В., Назаровець О. Б. Проблемні питання розрахунку часу евакуації при пожежах у закладах дошкільної та середньої освіти з інклюзивними групами. *Пожежна безпека*. 2020. Том 37. С. 72–76. DOI: 10.32447/20786662.37.2020.11.

Kovalyshyn V., Khlevnoy O., Haryshyn D. Primary school-aged children evacuation

45. from secondary education institutions with inclusive classes. *Sciences of Europe*. 2020. No. 60. P. 53–56. DOI: 10.24412/3162-2364-2020-60-1-53-56.

46. Ковалишин В. В., Хлевной О. В. Визначення площі горизонтальної проекції дітей шкільного віку. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2020. № 2 (10). С. 54–60.

47. Хлевной О. В. Нормування вимог пожежної безпеки до евакуаційних шляхів і виходів у закладах середньої освіти з інклюзивним навчанням : дис. канд. техн. наук : 21.06.02 / Львів. держ. ун-т безпеки життєдіяльності. Львів, 2021. 188 арк.

48. Тесленко О. М., Цимбалістий С. З., Кравченко Н. В., Доценко О. Г., Крикун О. М. Аналіз існуючих програмних комплексів для розрахунку часу евакуації людей під час пожежі. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2019. № 1 (7). С. 33–39.

49. Applications Simulex. Integrated Environmental Solutions IES. URL: <https://www.iesve.com/software/virtual-environment/applications/egress/simulex> (дата звернення: 05 березня 2023).

50. Pathfinder. Homepage Thunderhead Engineering.

URL: <https://www.thunderheadeng.com/pathfinder> (дата звернення: 04 січня 2023).

51. Opening opportunities with connected thinking. Global engineering, management and development consultants – Mott MacDonald.

URL: <http://www.mottmac.com/> (дата звернення: 05 березня 2022).

52. Fire Safety Engineering Group (FSEG) Home. Fire Safety Engineering Group (FSEG) Home. URL: https://fseg.gre.ac.uk/exodus/exodus_products (дата звернення: 05 березня 2023).

53. Провести дослідження щодо удосконалення методики розрахунку часу евакуації людей з будинків та споруд під час пожежі [Текст]: звіт про НДР (заклучн.)/ Український науково-дослідний інститут цивільного захисту; кер.теми С.З.Цимбалістий; відп. викон. О.Г. Доценко, О.М.Тесленко. Шифр теми Евакуація-методика. Київ, 2019, 203 с.

54. Евакуація людей, маломобільні люди різних груп, рух людських потоків, математичні моделі, небезпечні чинники пожежі. [Текст]: звіт про НДР (заклучн.)/ Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту; кер.теми О.М.Тесленко С.З.Цимбалістий; відп. викон. О.Г. Доценко, С.З.Цимбалістий. Шифр теми Евакуація-методика. Київ, 2019, 203 с.

55. Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac Technical Reference and User's Guide (FDS 6.6.0, Evac 2.5.2, DRAFT). P. 113.

56. EVACNET 4 [Електрон. ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: http://www.iklimnet.com/hotelfires/fire_egress_software_10.html (дата звернення: 05 березня 2024).

57. TraffGo HT, Start. URL: <https://www.traffgo-ht.com/downloads/pedestrians/downloads/documents/PedGo%20Tutorial.pdf> (дата звернення: 05 березня 2024).

58. PyroSim. Homepage | Thunderhead Engineering. URL: <https://www.thunderheadeng.com/pyrosim> (дата звернення: 10 лютого 2023).

59. Тесленко О. М., Цимбалістий С. З., Кравченко Н. В., Доценко О. Г., Крикун О. М. Аналіз існуючих програмних комплексів для розрахунку часу

евакуації людей під час пожежі. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2019. № 1 (7). С. 33-39.

60. Karolina Zydek, Małgorzata Król, Aleksander Król. Evacuation Simulation Focusing on Modeling of Disabled People Movement. *Sustainability* 2021. 2021. № 13, Article № 2405.

61. Hongliang Pan, Jun Zhang, Weibin Ma. Simulation of pedestrian Flow mixed with wheelchair users in funnel-shaped bottlenecks based on Pathfinder. *RSVT '20: Proceedings of the 2020 2nd International Conference on Robotics Systems and Vehicle Technology*. 2020. P. 83–88.

62. Michael Gerges, Peter Demian, Zulfikar Adamu. Customising Evacuation Instructions for High-Rise Residential Occupants to Expedite Fire Egress : Results from Agent-Based Simulation. *Fire* 2021. 2021. № 4, 21.

63. Chansol Ahn, Hyeongwoo Kim, Insu Choi, Dongho Rie. A Study on the Safety Evaluation of Escape Routes for Vulnerable Populations in Residential Facilities. *Sustainability* 2022. 2022. № 14. Article 5998.

64. Libi Fu, Huigui Qin, Yangjian He, Yongqian Shi. Application of the social force modelling method to evacuation dynamics involving pedestrians with disabilities. *Applied Mathematics and Computation*. 2024. № 460. Article 128297.

65. Цвіркун, С. В., Березовський, А. І., Березовська, Ю. В. Розрахунок часу евакуації людей з навчальної аудиторії під час пожежі. *Науковий вісник будівництва*. 2015. № 1. С. 214–219.

66. Цвіркун, С. В., Березовський, А. І., Мельник, В. П. Моделювання незадимлюваних сходових клітин програмно-обчислювальним комплексом Fire Dynamics Simulator (FDS). *Науковий вісник будівництва*. 2015. № 4. С. 203-207.

67. Майборода Р. І., Отрош Ю. А., Рашкевич Н. В., Мележик Р. С. Дослідження евакуації маломобільних груп населення з житлових висотних будинків при пожежі. *Комунальне господарство міст. Пожежна безпека*. 2023. Том 4, № 178. doi: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-219-231>.

68. Daamen W., Hoogendoorn S.P., Bovy P.H. First-order pedestrian traffic flow theory. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2005. Vol. 1934, №1. P. 43-52.
69. Fruin J. J. Pedestrian planning and design. *Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental planners*. New York, 1971. 206 p.
70. Helbing D. Johansson A., Al-Abideen H. Z. Dynamics of crowd disasters: An empirical study. *Physical Review E*. 2007. Vol. 75. P. 46-109.
71. Bruno L, Tosin A., Tricerri P., Venuti F. Non-local first-order modelling of crowd dynamics: A multidimensional framework with applications. *Applied Mathematical Modelling*. 2011. Vol. 35, №1. P. 426-445.
72. Colombo, R.M., Goatin P., Rosini M.D. A macroscopic model for pedestrian flows in panic situations. *International Series Mathematical Sciences and Applications*. 2010. Vol. 32. P. 255-272.
73. Thompson P., Nilsson D., Boyce K., McGrath D. Evacuation models are running out of time. *Fire Safety Journal*. 2015. P. 251-261.
74. Данілін О. М., Комяк В. М., Дворецька Т. О. Алгоритм моделювання індивідуально-потокowego руху людей при евакуації в умовах пожежі та його характеристики. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2019. № 1(29). С. 29-36.
75. Kirik, E. S., Yurgelian T. B., Kruglov D. V., Malyshev A. V. (2010). On the continuous-discrete stochastic model of people's movement. Modeling of nonequilibrium systems: *Materials of the XIII All-Russian Seminar "Modeling of nonequilibrium systems"*, Krasnoyarsk: ICM SB RAS. P 81–85.
76. Schadschneider, A., Klingsch, W., Kluepfel, H., Kretz, T., Rogsch, C., Seyfried A. (2009). Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and applications. *Encyclopedia of Complexity and System Science*, Springer.
77. Malinetskiy, G. G., Stepantsov, M. E. (2004). Application of cellular automata for modeling the motion of a group of people. *Zh. Vychisl. Math. and Math. Fiz*, 44 (11), 2094–2098.
78. Brailovsky, N. O., Granovsky, B. I. (1978). Modeling of transport, M., Transport, 125 p.

79. Komyak, V., Komyak, V.I., Danilin, A. (2017). A study of ellipse packing in the high-dimensionality problems // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/4 (85), P. 17–23.
80. Danilin, A. N., Komyak, V. V., Komyak, V. M., Pankratov, A. V., Sobol, A. N. (2016). Mathematical model of individual-flow foot traffic and traffic flows. *Visnyk of Kherson National Technical University*, Kherson: KNTU, № 3 (58), P. 501–505.
81. Danilin, A. N., Komyak, V. V., Pankratov, A. V. (2016). The approach to modeling the individual-and-flow movement of people in the flow // *Problems of fire safety: Compilation of scientific works*, Issue 39, Kharkiv: NUCZU, P. 84–93.
82. Kong-jin Zhu, Qin Shi. Experimental study on choice behavior of pedestrians during building evacuation. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 135. P. 207–216.
83. Всесвітня організація охорони здоров'я. Постійне представництво України при Відділенні ООН та інших міжнародних організаціях у Женеві. URL: <https://geneva.mfa.gov.ua/posolstvo/2612-who> (дата звернення: 02 січня 2024).
84. Доценко О. Г. Методика експериментальних досліджень евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності. *Комунальне господарство міст. Науково-технічний збірник. Серія : технічні науки та архітектура*. 2023. Том 6, № 180. С. 154–160.
85. Helbing, D., and Molnár, P., “Social force model for pedestrian dynamics”, *Physical Review E* 51: 4282–4286 p. (1995).
86. Helbing, D., Farkas, I., and Vicsek, T., “Simulating dynamical features of escape panic”, *Nature* 407: 487–490 p. (2000).
87. Helbing, D., Farkas, I., Molnár, P., and Vicsek, T., “Simulating of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations”, *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Schreckenberg, M. and Sharma, S.D. (eds.), Springer, Berlin, 2002, pp. 21–58.

88. Werner, T., and Helbing, D., “The social force pedestrian model applied to real life scenarios”, *Pedestrian and Evacuation Dynamics – Proceedings of the Second International Conference*, University of Greenwich, London, 2003, pp. 17–26.
89. Langston, P.A., Masling, R., and Asmar, B.N., “Crowd dynamics discrete element multi-circle model”, *Safety Science* 44: 395–417 (2006).
90. Korhonen, T., Hostikka, S., Heliövaara, S., Ehtamo, H., and Matikainen, K., “Integration of an Agent Based Evacuation Simulation and the State-of-the-Art Fire Simulation”, *Proceedings of the 7th Asia-Oceania Symposium on Fire Science & Technology*, 20–22 September, 2007, Hong Kong, (in print).
91. Korhonen, T., Hostikka, S., Heliövaara, S., Ehtamo, H., and Matikainen, K., “FDS+Evac: Evacuation Module for Fire Dynamics Simulator”, *Proceedings of the Interflam2007: 11th International Conference on Fire Science and Engineering*, Interscience Communications Limited, London, UK, pp. 1443–1448 (2007).
92. Korhonen, T., Hostikka, S., Heliövaara, S., and Ehtamo, H., “FDS+Evac: Modelling Social Interactions in Fire Evacuation”, *Proceedings of the 7th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods*, SFPE, Bethesda, MD, USA, pp. 241–250 (2008).
93. Korhonen, T., Hostikka, S., Heliövaara, S., and Ehtamo, H., “FDS+Evac: An Agent Based Fire Evacuation Model”, *Proceedings of the 4th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics*, February 27–29, 2008, Wuppertal, Germany.
94. Heliövaara, S., Korhonen, T., Hostikka, S., and Ehtamo, H., “Counterflow model for agent-based simulation of crowd dynamics”, *Building and Environment* 48: 89–100, 2012.
95. Kretz, T., Grünebohm, A., Kaufman, M., Mazur, F., and Schreckenberg, M., “Experimental Study of Pedestrian Counterflow in a Corridor”, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* P10001, 2006.
96. Ковалишин В. В., Доценко О. Г., Хлевной О. В., Дивень В. І., Борисова А.С. Experimental research simulation on evacuation of mixed flows consisting of different mobility groups. *Збірник наукових праць Черкаського*

інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація». 2023. Том. 7 № 2. С. 89–99. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.2.89.99>.

97. Khlevnoi, O., Dotsenko, O., Kovalyshyn, V., Parkhomenko, V.-P., Dyven, V., Borysova, A., Vovk, S. (2024). Improvement of the methodology for determining the movement parameters of individuals with visual impairments during evacuation from higher education institutions with inclusive education using a simplified analytical model. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (3 (128)), С. 60–69. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.302950>.

98. Методика та організація наукових досліджень : навч. посіб. Суми: СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2016. 260 с.

99. Літнарівч Р.М. Побудова і дослідження математичної моделі за джерелами експериментальних даних методами регресійного аналізу. Навчальний посібник, МЕНУ, Рівне, 2011.-140 с.

100. Методи аналізу даних : навчальний посібник для студентів / В.Є. Бахрушин. – Запоріжжя : КПУ, 2011. – 268 с.

101. Burak N., Khlevnoi O., Zhezlo-Khlevna N., Raita D., Dotsenko O. Improving of simplified analytical model for calculating the evacuation duration in higher education institutions with inclusive groups using machine learning methods. *Intelligent systems of decision-making and problems of computational intelligence*. XX international scientific internet conference, June 20-23, 2024, Khmelnytskyi, Ukraine, Usti nad Labem, Czech Republic 2024. P. 23-2.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Список опублікованих праць за темою дисертації

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Тесленко О. М., Цимбалістий С. З., Кравченко Н. В., **Доценко О. Г.**, Крикун О. М. Аналіз існуючих програмних комплексів для розрахунку часу евакуації людей під час пожежі. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2019. № 1 (7). С. 33–39. DOI: <https://doi.org/10.33269/nvcz.2019.1.33-39>.
2. Ковалишин В. В., **Доценко О. Г.**, Хлевной О. В., Дивень В. І. Дослідження евакуації людей різних груп мобільності з торговельно-розважального центру. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 2 (14). С. 99–107. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2\(14\).99-107](https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2(14).99-107). (індексується в *Index Copernicus International*).
3. **Доценко О.** Методика експериментальних досліджень евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності. *Комунальне господарство міст*. 2023. 6, 180 (Груд. 2023), С. 54–159. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-6-180-154-159>. (індексується в *Index Copernicus International*).
4. Ковалишин В. В., **Доценко О. Г.**, Хлевной О. В., Дивень В. І., Борисова А.С. Experimental research simulation on evacuation of mixed flows consisting of different mobility groups. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. 2023. Том. 7 № 2. С. 89–99. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.2.89.99>.
5. Borysova A., **Dotsenko O.**, Ensuring fire safety and evacuation of population groups with low mobility from shopping and entertainment centers: challenges and prospects. *The scientific heritage* No 135 (2024), С. 51–53. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11044740>.
6. Khlevnoi, O., **Dotsenko, O.**, Kovalyshyn, V., Parkhomenko, V.-P.,

Dyven, V., Borysova, A., Vovk, S. (2024). Improvement of the methodology for determining the movement parameters of individuals with visual impairments during evacuation from higher education institutions with inclusive education using a simplified analytical model. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (3 (128)), С. 60–69. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.302950>.

Апробація результатів дисертації:

7. Ковалишин В. В., Доценко О. Г., Хлевой О. В. Дослідження евакуації людей з обмеженою мобільністю із торговельно-розважального центру. *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення*: Всеукр. наук.-практ. конф., з міжнародною участю. м. Львів, 12-13 жовт. 2022. Львів, 2022. С. 43-46.

8. Доценко О. Г., Ковалишин В. В. Дослідження процесів евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності за допомогою комп'ютерного моделювання. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності*: Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених, курсантів та студентів. м. Львів, 28-29 бер. 2024. Львів, 2024. С. 169-173.

9. Доценко О. Г., Борисова А.С., Помазанова Т.І. Критерії впливу та закономірності зміни параметрів швидкості руху людських потоків від наявності різних груп мобільності в торговельно-розважальних центрах. *Problems of Emergency Situations*: Міжнар. наук.-практ. конф. м. Харків, 16 трав. 2024. Львів, 2024. С. 28-29.

10. Доценко О. Г., Дишкант О. В. Залежність евакуаційної швидкості руху людських потоків від перебування в них осіб, що пересуваються на кріслах колісних. *Innovations and prospects of world science: proceedings of XII International Scientific and Practical Conference*. Vancouver, 20-22 лип., Vancouver, 2022. С. 114-117.

11. Дишкант О. В., Дивень В.І., Доценко О. Г., Савченко О.В. Чинники, які впливають на швидкість евакуації. *Moderní aspekty vědy*. Svazek XXII mezinárodní kolektivní monografie. Česká republika. 2022 С. 516-526.

12. Доценко О. Г., Тесленко О. М., Цимбалістий С. З., Крикун О. М.

Створення комплексного механізму прийняття управлінських рішень для оцінки пожежного ризику на об'єктах з масовим перебуванням людей. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист*: матеріали X Всеук. наук.-практ. конф. з міжн. уч. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 29-30 жовт. 2020. С. 96-98.

13. **Доценко О. Г.**, Бабенко Д. М., Луценко Ю. В., Дивень В. І. Дослідження евакуації та рятування людей з обмеженою мобільністю із торговельного центру пожежно-рятувальними підрозділами. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист*: матеріали XII Всеукр. наук.-практ. конф., з міжнародною участю. м. Черкаси, 27-28 жовт. 2022. Черкаси, 2022. С. 21-23.

14. **Доценко О. Г.**, Цимбалістий С. З., Крикун О. М. Дослідження евакуації маломобільних груп населення в умовах змішаних потоків. *Theoretical and empirical scientific research: concept and trends*. VI International Scientific and Practical Conference, 2 лют., 2024; Oxford, UK, 2024. С.149-152.

15. Burak N., Khlevnoi O., Zhezlo-Khlevna N., Raita D., **Dotsenko O.** Improving of simplified analytical model for calculating the evacuation duration in higher education institutions with inclusive groups using machine learning methods. *Intelligent systems of decision-making and problems of computational intelligence*. XX international scientific internet conference, June 20-23, 2024, Khmelnytskyi, Ukraine, Usti nad Labem, Czech Republic 2024. P. 23-25.

16. І.О. Васильєв, І.В. Бабійчук, К.Г. Белікова, **О.Г. Доценко**, В.М. Михайлов, В.В. Ніжник, А.В. Пруський, С.П. Потеряйко, Н.М. Романюк, О.М. Тесленко, В.О. Тищенко. Навчально-методичний посібник «Управління оповіщенням та евакуацією людей з будинків і споруд під час пожежі. – Київ: Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, 2022. – 474 с.

ДОДАТОК Б

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Т.в.о. проректора з навчальної та методичної
роботи Львівського державного університету

безпеки життєдіяльності

кандидат технічних наук, доцент

Олександр ПРИДАТКО



09 2024 року

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи

ДОЦЕНКА Олександра Григоровича

за темою: «Удосконалення розрахункового методу визначення тривалості
евакуації людей в торговельно-розважальних центрах з урахуванням наявності
маломобільних людей різних груп»

Комісія у складі начальника кафедри наглядово-профілактичної діяльності та автоматики кандидата технічних наук Пазена Олега Юрійовича, доцента кафедри наглядово-профілактичної діяльності та автоматики кандидата технічних наук, доцента Башинського Олега Івановича та доцента кафедри наглядово-профілактичної діяльності та автоматики кандидата технічних наук, доцента Кушніра Андрія Петровича склала цей акт яким засвідчує, що результати дисертаційної роботи Доценка Олександра Григоровича за темою: «Удосконалення розрахункового методу визначення тривалості евакуації людей в торговельно-розважальних центрах з урахуванням наявності маломобільних людей різних груп» впроваджено в навчальний процес кафедри наглядово-профілактичної діяльності та автоматики при викладанні дисципліни «Пожежна профілактика в населених пунктах». В матеріалах лекцій використано теоретичні положення та методичні підходи дисертаційної роботи щодо проведення навчальних евакуацій з торговельно-розважальних центрів спрямованих на підвищення ефективності евакуаційного процесу в умовах наявності маломобільних груп населення та розрахунку часу евакуації людей з урахуванням наявності маломобільних осіб різних груп, із різним відсотковим співвідношенням.

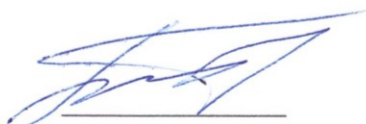
Акт складений для подання до разової спеціалізованої вченої ради у зв'язку із захистом дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 26 «Цивільна безпека» за спеціальністю 261 «Пожежна безпека».

Голова:


(підпис)

Олег ПАЗЕН

Члени комісії:


(підпис)

Олег БАШИНСЬКИЙ


(підпис)

Андрій КУШНІР



ДСНС України
ІНСТИТУТ ДЕРЖАВНОГО УПРАВЛІННЯ ТА НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
З ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ
 (ІДУ НД ЦЗ)

вул. Вишгородська, 21, м. Київ, 04074, тел. (044) 430-82-17, факс (044) 430-91-91
<https://idundcz.dsns.gov.ua> ЄДРПОУ 43533709 idundcz@dsns.gov.ua

17.07.2024 № 94-1900/94

На № _____ від _____

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

Результати дисертаційного дослідження старшого наукового співробітника відділу моделювання пожеж та надзвичайних ситуацій науково-дослідного центру протипожежного захисту Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту (далі – Інститут), Доценка Олександра Григоровича на тему: «Удосконалення розрахункового методу визначення тривалості евакуації людей в торговельно-розважальних центрах з урахуванням наявності маломобільних людей різних груп» на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 «Пожежна безпека» впроваджено в освітню діяльність кафедри профілактики пожеж та безпеки життєдіяльності населення Інституту, зокрема пропозиції та рекомендації дисертанта щодо удосконалення методики розрахунку часу евакуації людей з торговельно-розважальних центрів з урахуванням наявності маломобільних осіб різних груп, із різним відсотковим співвідношенням та рекомендацій щодо проведення навчальних евакуацій з торговельно-розважальних центрів, спрямованих на підвищення ефективності евакуаційного процесу в умовах наявності маломобільних груп населення, під час викладання дисципліни «Системи запобігання пожежі та управління пожежною безпекою об'єктів захисту».

Заступник начальника Інституту
 з навчальної роботи
 доктор технічних наук, професор



Сергій ЄРЕМЕНКО



ТОВ «ПРОТИПОЖЕЖНИЙ ЗАХИСТ ТА ОХОРОННІ СИСТЕМИ» (ТОВ «ПЗ ТА ОС»)

02121, м.Київ, вул. Автопаркова, 7, ЄДРПОУ: 43494204, ІНП: 434942026519
п/р: № UA823052990000026006006214381 в АТ КБ «ПРИВАТБАНК» (код банку 300711)

e-mail: info@firesecurity.com.ua • www.firesecurity.com.ua

+38 073 919 11 01 • +38 095 919 11 01 • +38 067 919 11 01

04.07.2024

м. Київ

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Доценка Олександра Григоровича
за темою: «Удосконалення розрахункового методу визначення тривалості
евакуації людей в торговельно-розважальних центрах з урахуванням
наявності маломобільних людей різних груп»

Даний акт складено про те, що на підприємстві ТОВ «Противопожечний захист та охоронні системи» були впроваджені результати дисертаційної роботи Доценка Олександра Григоровича за темою «Удосконалення розрахункового методу визначення тривалості евакуації людей в торговельно-розважальних центрах з урахуванням наявності маломобільних людей різних груп».

Впроваджено та застосовано удосконалений розрахунковий метод визначення часу евакуації людей під час пожежі з урахуванням наявності маломобільних осіб різних груп, із різним відсотковим співвідношенням.

На основі запропонованих рекомендацій щодо проведення навчальних евакуацій з торговельно-розважального центру спрямованих на підвищення ефективності евакуаційного процесу в умовах наявності маломобільних груп населення, проведено тренінги для персоналу з метою підвищення ефективності евакуації маломобільних людей.

Директор



О.А. Лісовий

ДОДАТОК В

Результати експериментальних досліджень евакуації змішаних потоків
людей різних груп мобільності

Таблиця В.1

Значення швидкості і щільності людського потоку М1 та М3 (на опорах)
(М1 (96,67 %)+М3 (3,33 %))

№ спостереження	$V_{сер}$	$D_{сер}$	№ спостереження	$V_{сер}$	$D_{сер}$
1	86,65	0,04	24	61,27	0,36
2	88,79	0,04	25	60,02	0,37
3	90,00	0,05	26	56,71	0,38
4	80,00	0,09	27	56,17	0,38
5	81,47	0,09	28	57,82	0,39
6	80,00	0,09	29	59,06	0,39
7	76,67	0,11	30	53,11	0,41
8	76,67	0,11	31	51,36	0,43
9	70,00	0,13	32	54,32	0,43
10	70,00	0,15	33	52,70	0,45
11	69,03	0,19	34	49,65	0,45
12	67,84	0,21	35	49,00	0,46
13	69,83	0,22	36	50,41	0,46
14	64,49	0,24	37	51,57	0,46
15	63,26	0,27	38	45,55	0,48
16	66,65	0,27	39	43,73	0,50
17	66,27	0,29	40	46,62	0,51
18	62,36	0,29	41	44,79	0,52
19	62,05	0,30	42	42,45	0,53
20	64,24	0,31	43	43,56	0,54
21	65,63	0,31	44	38,48	0,58
22	59,81	0,33	45	36,50	0,59
23	58,20	0,35	46	35,21	0,61

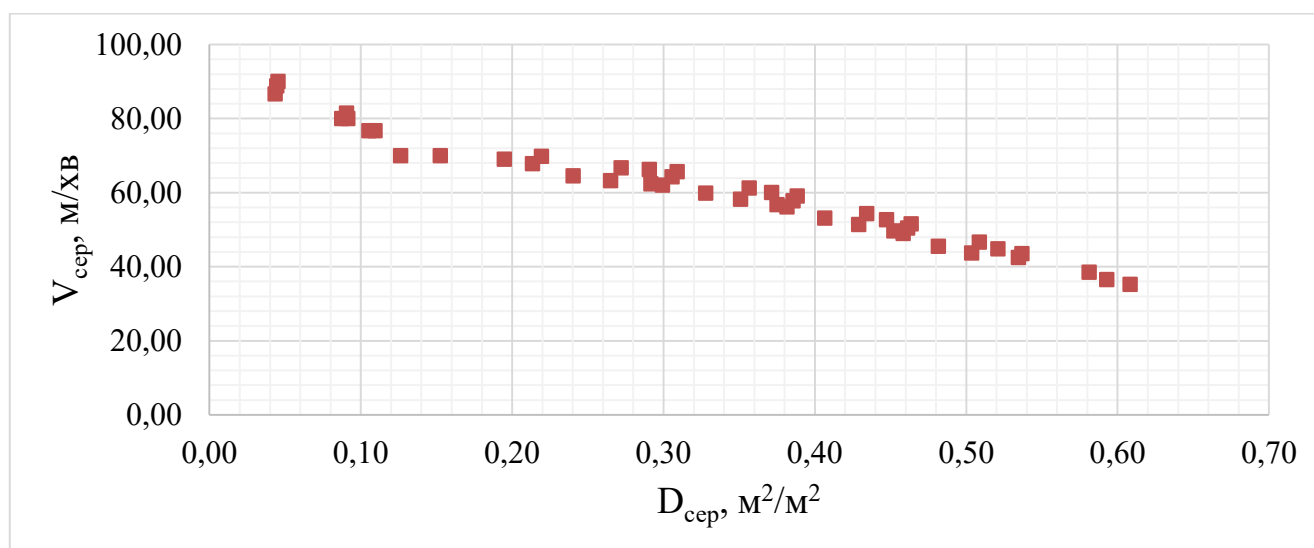


Рисунок В.1 – Параметри змішаного потоку М1 (96,67 %)+М3 (3,33 %)

Таблиця В.2

Значення швидкості і щільності людського потоку М1 та М3 (на опорах)

(М1 (93,33 %)+М3 (6,67 %))

№ спостереження	$V_{сер}$	$D_{сер}$	№ спостереження	$V_{сер}$	$D_{сер}$
1	80,00	0,08	19	41,25	0,36
2	65,00	0,09	20	32,73	0,39
3	70,00	0,10	21	24,00	0,59
4	65,00	0,11	22	24,36	0,62
5	60,00	0,11	23	23,73	0,64
6	60,00	0,16	24	25,16	0,65
7	50,00	0,18	25	20,68	0,67
8	58,84	0,20	26	20,99	0,69
9	47,02	0,25	27	20,59	0,71
10	61,33	0,25	28	18,36	0,73
11	53,51	0,25	29	20,58	0,74
12	47,02	0,26	30	16,02	0,78
13	48,98	0,26	31	15,60	0,81
14	52,98	0,27	32	14,92	0,82
15	51,39	0,30	33	14,82	0,83
16	43,50	0,31	34	14,89	0,84
17	42,93	0,33	35	14,05	0,86
18	41,75	0,36			

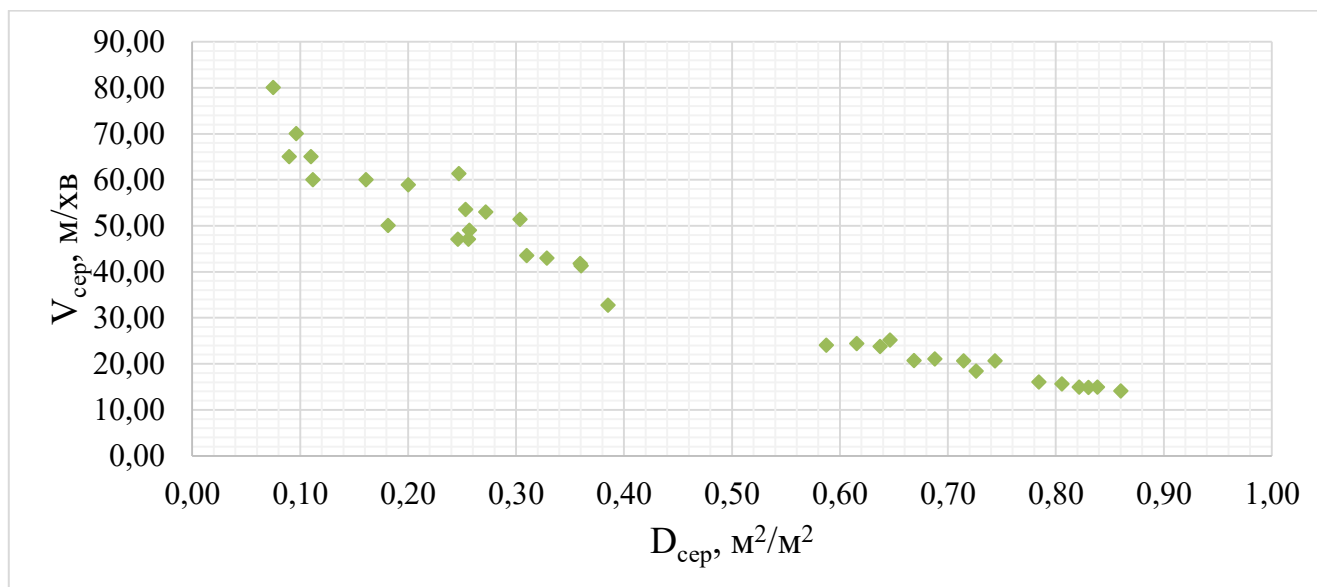


Рисунок В.2 – Параметри змішаного потоку М1 (93,33 %)+М3 (6,67 %)

Таблиця В.3

Значення швидкості і щільності людського потоку М1 та М3 (на опорах)
(М1 (90 %)+М3 (10 %))

№ спостереження	$V_{сер}$	$D_{сер}$	№ спостереження	$V_{сер}$	$D_{сер}$
1	76,37	0,05	20	44,86	0,34
2	65,00	0,11	21	48,10	0,35
3	70,00	0,11	22	37,97	0,37
4	60,00	0,11	23	38,09	0,38
5	60,00	0,12	24	37,26	0,40
6	60,00	0,12	25	40,48	0,40
7	63,33	0,13	26	41,87	0,45
8	63,33	0,13	27	41,76	0,53
9	50,00	0,17	28	35,66	0,55
10	55,00	0,18	29	38,04	0,58
11	59,73	0,23	30	34,51	0,62
12	63,02	0,24	31	29,46	0,64
13	51,88	0,26	32	31,86	0,70
14	52,99	0,26	33	28,34	0,71
15	53,16	0,27	34	23,29	0,73
16	52,37	0,29	35	25,70	0,77
17	44,45	0,31	36	23,23	0,79
18	45,54	0,32	37	17,15	0,83
19	45,68	0,32			

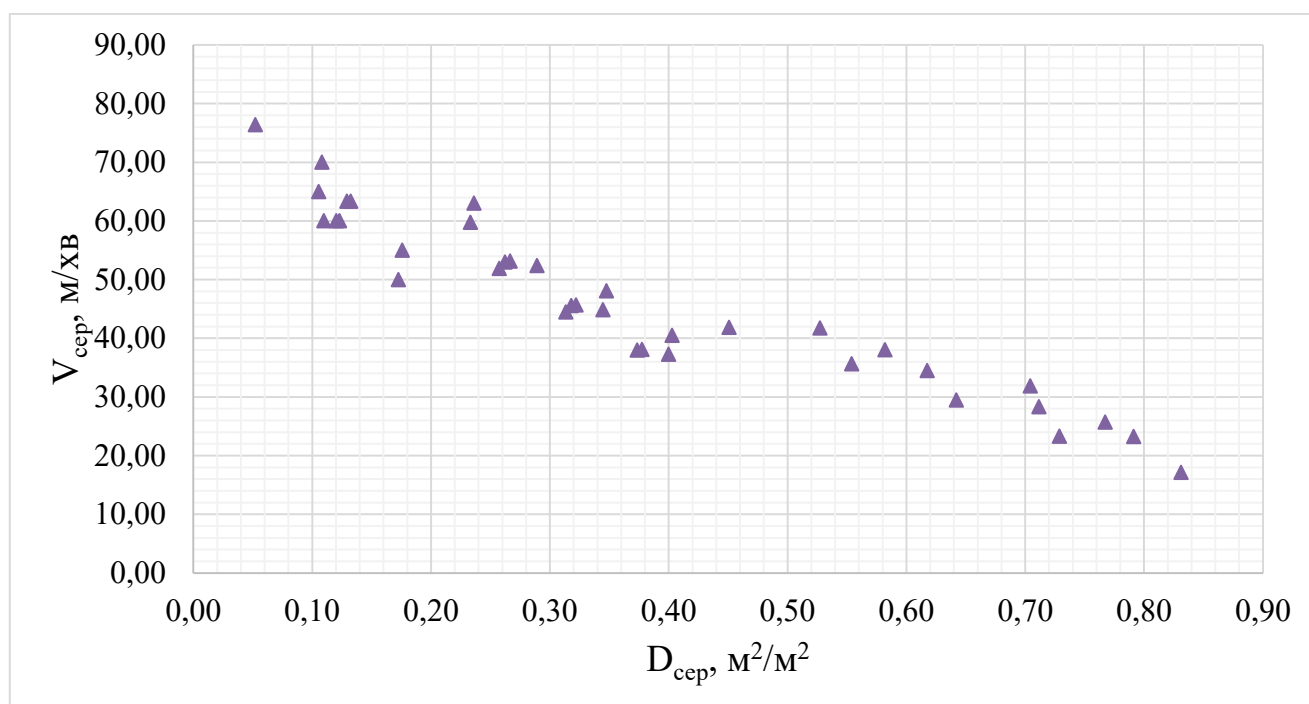


Рисунок В.3 – Параметри змішаного потоку М1 (90 %)+М3 (10 %)

Таблиця В.4

Значення швидкості і щільності людського потоку М1 та М4 (крісла колісні)
(М1 (96,67 %)+М4 (3,33 %))

№ спостереження	$V_{сер}$	$D_{сер}$	№ спостереження	$V_{сер}$	$D_{сер}$
1	80,00	0,09	22	49,61	0,39
2	65,00	0,14	23	49,75	0,40
3	60,00	0,15	24	50,16	0,41
4	60,00	0,16	25	47,00	0,43
5	60,00	0,16	26	46,20	0,43
6	56,67	0,18	27	46,27	0,44
7	55,00	0,20	28	46,61	0,45
8	57,85	0,25	29	43,38	0,45
9	56,01	0,26	30	42,51	0,46
10	56,19	0,27	31	42,53	0,47
11	57,06	0,29	32	42,81	0,49
12	58,06	0,30	33	39,54	0,49
13	55,40	0,31	34	38,63	0,50
14	55,03	0,32	35	38,59	0,51
15	55,47	0,33	36	38,84	0,51
16	56,15	0,34	37	35,52	0,52
17	53,22	0,34	38	34,72	0,55
18	52,63	0,36	39	31,37	0,56
19	52,89	0,37	40	30,49	0,58
20	53,40	0,38	41	26,15	0,62
21	50,33	0,39			

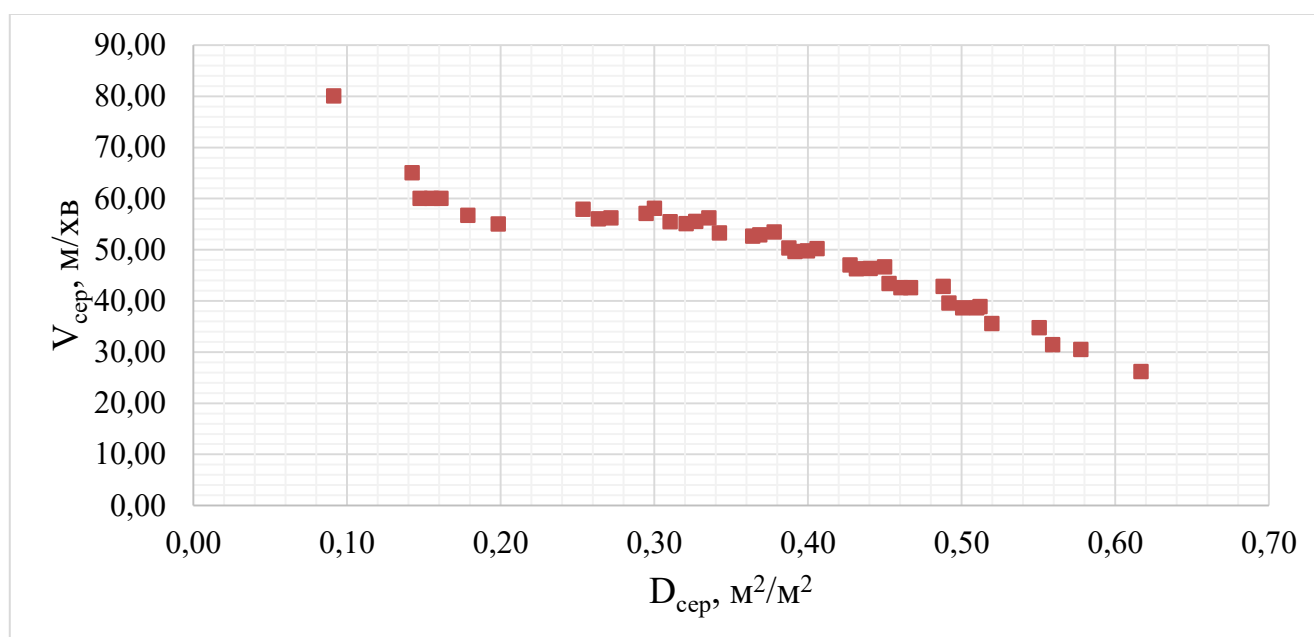


Рисунок В.4 – Параметри змішаного потоку М1 (96,67 %)+М4 (3,33 %)

Таблиця В.5

Значення швидкості і щільності людського потоку М1 та М4 (крісла колісні)
(М1 (93,33 %)+М4 (6,67 %))

№ спостереження	$V_{сер}$	$D_{сер}$	№ спостереження	$V_{сер}$	$D_{сер}$
1	64,04	0,05	21	35,50	0,54
2	61,75	0,05	22	31,93	0,54
3	60,00	0,05	23	34,79	0,56
4	50,00	0,11	24	33,56	0,57
5	50,00	0,12	25	35,95	0,58
6	46,67	0,17	26	28,70	0,62
7	43,40	0,24	27	25,00	0,63
8	42,12	0,25	28	27,73	0,64
9	46,71	0,27	29	26,28	0,66
10	48,04	0,30	30	28,78	0,67
11	49,27	0,30	31	23,15	0,71
12	45,06	0,35	32	21,22	0,71
13	42,13	0,36	33	20,07	0,73
14	45,56	0,38	34	18,44	0,75
15	45,29	0,40	35	21,03	0,75
16	47,23	0,40	36	19,02	0,79
17	41,23	0,45	37	19,57	0,80
18	37,88	0,45	38	19,34	0,80
19	40,94	0,47	39	14,30	0,84
20	40,05	0,49			

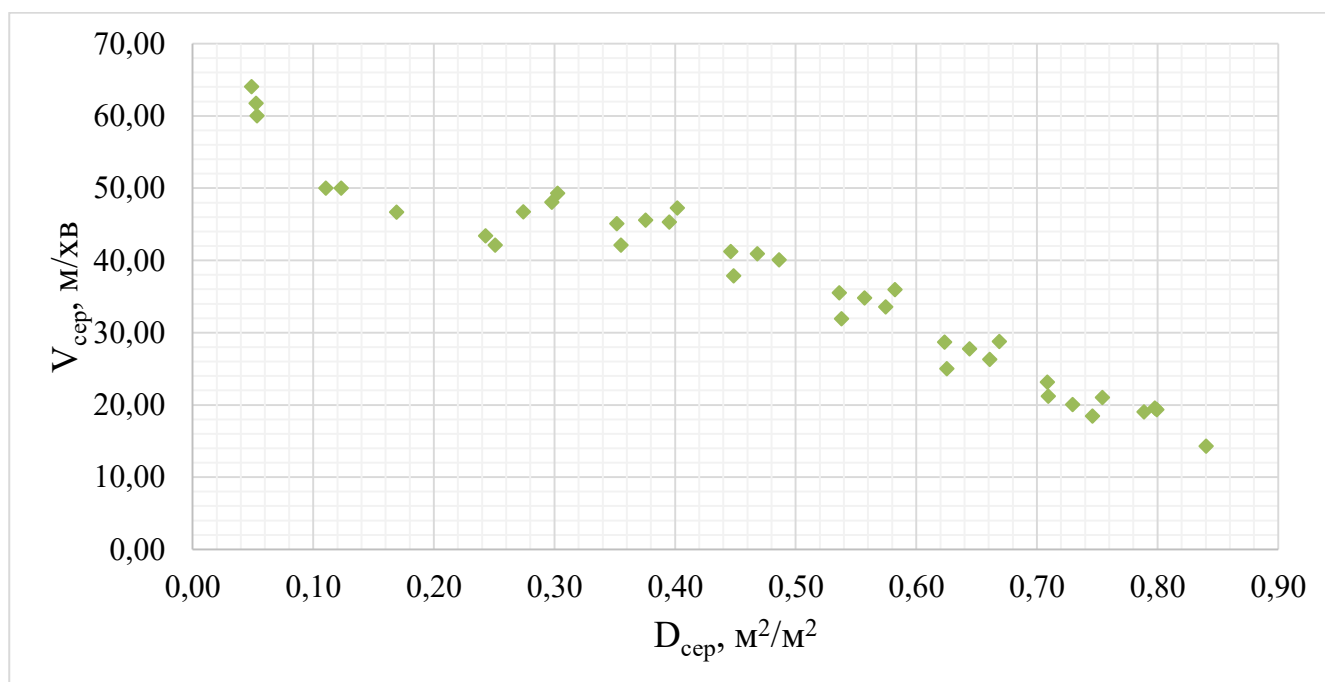


Рисунок В.5 – Параметри змішаного потоку М1 (93,33 %)+М4 (6,67 %)

Таблиця В.6

Значення швидкості і щільності людського потоку М1 та М4 (крісла колісні)
(М1 (90 %)+М4 (10 %))

№ спостереження	$V_{сер}$	$D_{сер}$	№ спостереження	$V_{сер}$	$D_{сер}$
1	63,33	0,14	23	33,08	0,39
2	55,00	0,15	24	30,41	0,39
3	50,00	0,16	25	34,05	0,41
4	45,00	0,18	26	31,44	0,42
5	40,00	0,20	27	28,54	0,43
6	46,44	0,21	28	33,64	0,44
7	43,14	0,21	29	32,74	0,45
8	39,26	0,22	30	31,11	0,46
9	43,58	0,23	31	27,00	0,47
10	41,57	0,24	32	28,42	0,48
11	38,24	0,25	33	22,18	0,50
12	34,32	0,26	34	25,00	0,50
13	36,32	0,26	35	25,87	0,51
14	34,15	0,27	36	25,35	0,53
15	34,01	0,28	37	23,93	0,54
16	37,82	0,30	38	24,34	0,54
17	34,17	0,32	39	24,44	0,55
18	39,13	0,33	40	23,55	0,56
19	36,30	0,34	41	24,10	0,56
20	37,05	0,38	42	21,92	0,57
21	34,41	0,38	43	19,22	0,59
22	30,42	0,39			

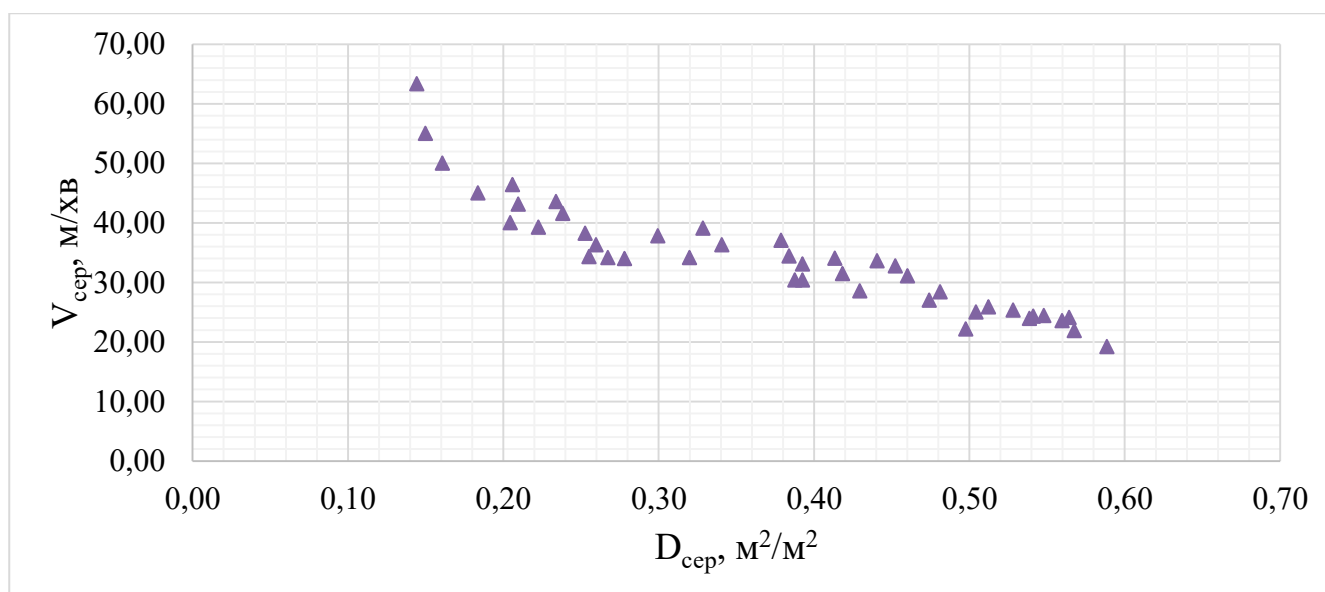


Рисунок В.6 – Параметри змішаного потоку М1 (90 %)+М4 (10 %)

Таблиця В.7

Значення швидкості і щільності людського потоку М1, М3 (на опорах) та
М4 (крісла колісні) (М1 (90 %) + М3 (3,33 %) + М4 (6,67 %))

№ спостереження	$V_{сер}$	$D_{сер}$	№ спостереження	$V_{сер}$	$D_{сер}$
1	70,00	0,06	23	28,75	0,44
2	60,00	0,12	24	28,07	0,45
3	60,00	0,12	25	29,81	0,50
4	56,67	0,13	26	26,83	0,51
5	55,00	0,15	27	29,45	0,53
6	50,00	0,15	28	30,84	0,54
7	50,00	0,16	29	28,49	0,55
8	50,00	0,17	30	29,89	0,56
9	50,00	0,19	31	26,14	0,57
10	47,97	0,23	32	28,23	0,58
11	48,43	0,24	33	29,21	0,59
12	46,96	0,27	34	26,54	0,62
13	44,67	0,28	35	27,68	0,63
14	46,18	0,29	36	23,72	0,65
15	40,49	0,30	37	25,61	0,66
16	39,02	0,31	38	26,43	0,67
17	39,44	0,32	39	23,62	0,68
18	37,92	0,35	40	24,63	0,69
19	37,07	0,37	41	20,55	0,70
20	36,35	0,38	42	22,35	0,71
21	34,75	0,39	43	16,96	0,78
22	30,60	0,42			

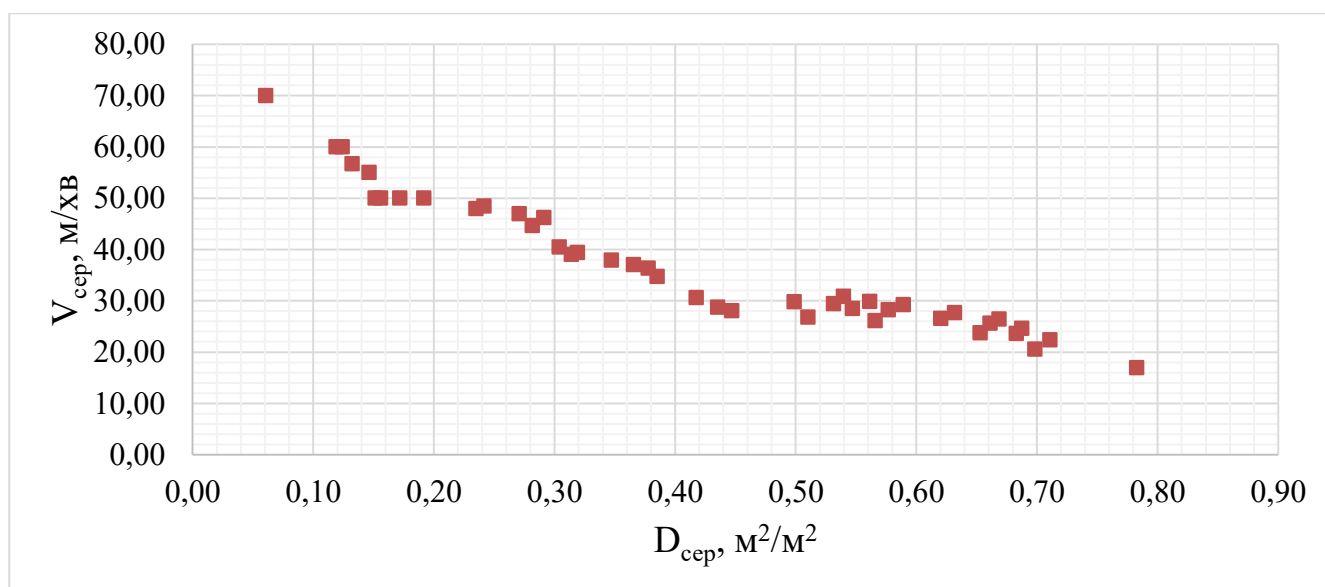


Рисунок В.7 – Параметри змішаного потоку М1 (90 %)+М3 (3,33 %)+М4 (6,67 %)

Таблиця В.8

Значення швидкості і щільності людського потоку М1, М3 (на опорах) та М4 (крісла колісні) (М1 (90 %) + М3 (6,67 %) + М4 (3,33 %))

№ спостереження	$V_{сер}$	$D_{сер}$	№ спостереження	$V_{сер}$	$D_{сер}$
1	80,00	0,10	24	48,06	0,39
2	80,00	0,11	25	45,19	0,39
3	80,00	0,12	26	40,17	0,40
4	73,33	0,14	27	43,83	0,41
5	70,00	0,14	28	41,03	0,43
6	60,00	0,16	29	38,03	0,44
7	55,00	0,17	30	38,15	0,45
8	60,00	0,17	31	38,48	0,46
9	60,00	0,18	32	38,05	0,47
10	50,00	0,19	33	39,25	0,48
11	54,06	0,20	34	40,77	0,49
12	62,19	0,22	35	37,94	0,51
13	62,30	0,22	36	33,42	0,52
14	59,40	0,23	37	30,02	0,54
15	63,54	0,25	38	36,57	0,54
16	61,65	0,26	39	33,83	0,56
17	57,48	0,27	40	33,40	0,57
18	57,45	0,30	41	28,74	0,58
19	52,84	0,32	42	27,03	0,61
20	54,45	0,34	43	28,67	0,62
21	51,75	0,35	44	24,09	0,63
22	46,90	0,36	45	23,57	0,65
23	50,70	0,37	46	18,45	0,69

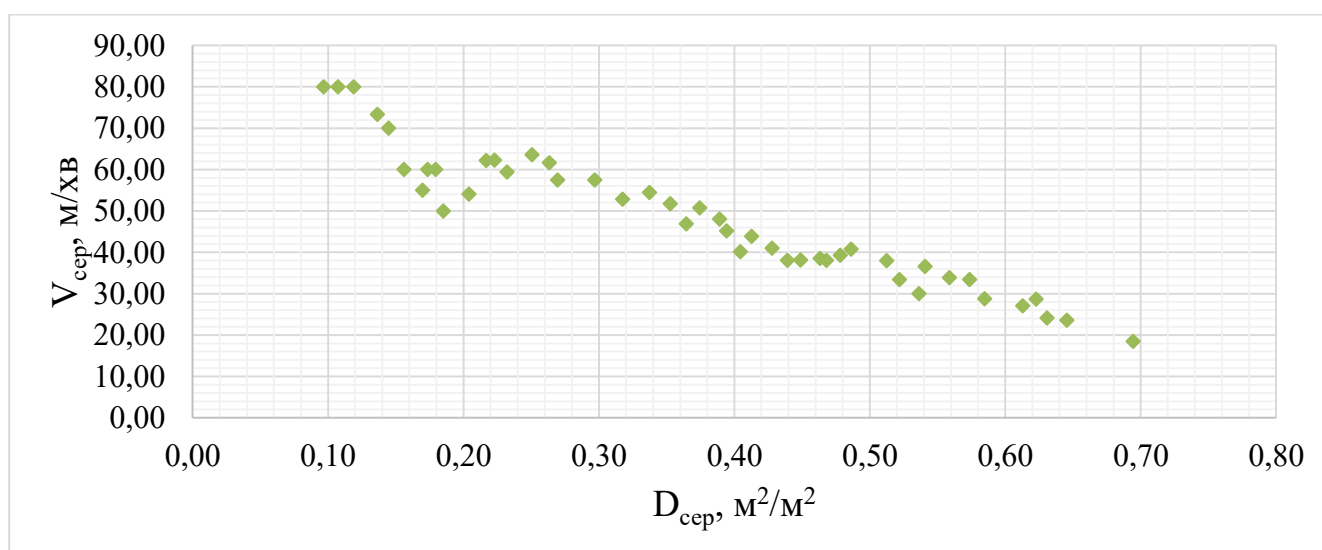


Рисунок В.8 – Параметри змішаного потоку М1 (90 %)+М3 (6,67 %)+М4 (3,33 %)

Таблиця В.9

Значення швидкості і щільності людського потоку М1, М3 (на опорах) та
М4 (крісла колісні) (М1 (93,33 %) + М3 (3,335 %) + М4 (3,335 %))

№ спостереження	$V_{сер}$	$D_{сер}$	№ спостереження	$V_{сер}$	$D_{сер}$
1	67,00	0,11	22	31,95	0,48
2	66,50	0,12	23	32,67	0,49
3	66,00	0,13	24	36,41	0,52
4	65,00	0,15	25	36,31	0,53
5	64,00	0,15	26	35,48	0,55
6	60,00	0,16	27	32,72	0,56
7	55,67	0,17	28	32,95	0,57
8	54,00	0,19	29	28,42	0,59
9	57,00	0,21	30	28,64	0,60
10	61,30	0,22	31	28,40	0,62
11	57,51	0,22	32	28,26	0,63
12	53,19	0,23	33	27,40	0,64
13	48,54	0,24	34	24,60	0,65
14	52,04	0,25	35	24,80	0,66
15	50,57	0,27	36	20,40	0,69
16	42,46	0,28	37	20,07	0,70
17	41,31	0,30	38	20,12	0,72
18	40,20	0,31	39	19,95	0,73
19	39,52	0,36	40	19,07	0,74
20	36,65	0,40	41	16,43	0,76
21	31,40	0,45			

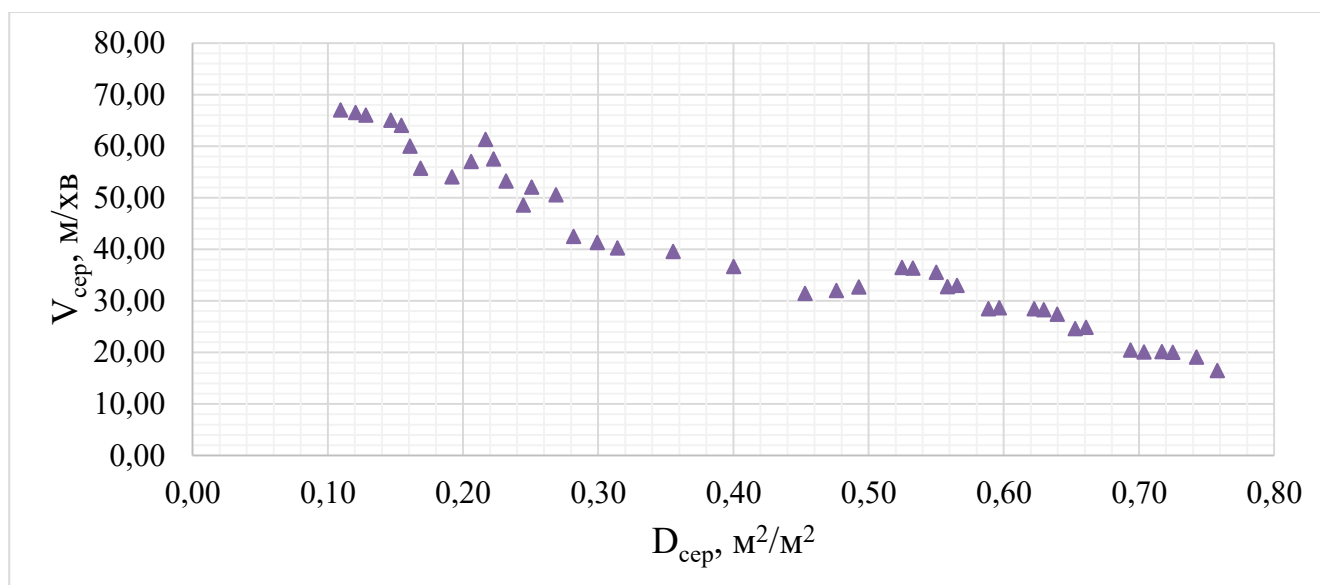


Рисунок В.9 – Параметри змішаного потоку М1 (93,33 %) + М3 (3,335 %) + М4 (3,335 %)

ДОДАТОК Г

Результати моделювання експериментальних досліджень евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності за допомогою програмного забезпечення

1 РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВІДПОВІДНО ДО ДАНИХ ВИКЛАДЕНИХ В ДСТУ 8828:2019 ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Результати моделювання руху потоку агентів групи мобільності М1 (100 %) без наявності в ньому маломобільних груп населення

Таблиця Г.1.1

Час завершення евакуації та шлях евакуації агентів

Значення даних	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
М1 (с)	30	27,9	49,7	38,9	6,3
Шлях евакуації для всіх агентів (м)	30	45,3	54,1	49,2	2,3

Таблиця Г.1.2

Відстань руху агентів

Профіль	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
М1 (м)	30	45,3	54,1	49,2	2,3

Таблиця Г.1.3

Пропускна здатність евакуаційного виходу

Вихід	Увійшов перший агент (с)	Увійшов останній агент (с)	Кількість агентів що використали (люд)	Середній потік (люд/с)
Евакуаційний вихід	27,9	49,7	30	1,38

Результати моделювання руху потоку агентів груп мобільності

M1 (96,67 %) та M3 (3,33 %)

Таблиця Г.1.4

Час завершення евакуації та шлях евакуації агентів

Значення даних	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (с)	29	27,9	51,3	39,8	6,5
M3 (с)	1	50,3	50,3	50,3	0
Шлях евакуації для всіх агентів (м)	30	45,3	55,6	49,2	2,3

Таблиця Г 1.5

Відстань руху агентів

Профіль	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (м)	29	45,3	55,6	49,2	2,3
M3 (м)	1	48,1	48,1	48,1	0

Таблиця Г.1.6

Пропускна здатність евакуаційного виходу

Вихід	Увійшов перший агент (с)	Увійшов останній агент (с)	Кількість агентів що використали (люд)	Середній потік (люд/с)
Евакуаційний вихід	27,9	51,3	30	1,28

Результати моделювання руху потоку агентів груп мобільності

M1 (93,33 %) та M3 (6,67 %)

Таблиця Г.1.7

Час завершення евакуації та шлях евакуації агентів

Значення даних	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (с)	28	27,9	52,5	40,4	7
M3 (с)	2	50,9	54,3	52,6	1,7
Шлях евакуації для всіх агентів (м)	30	45,3	57,4	49,6	3

Таблиця Г.1.8

Відстань руху агентів

Профіль	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (м)	28	45,3	57,4	49,6	3
M3 (м)	2	47	51,5	49,2	2,2

Таблиця Г.1.9

Пропускна здатність евакуаційного виходу

Вихід	Увійшов перший агент (с)	Увійшов останній агент (с)	Кількість агентів що використали (люд)	Середній потік (люд/с)
Евакуаційний вихід	27,9	54,3	30	1,13

Результати моделювання руху потоку агентів груп мобільності

M1 (90 %) та M3 (10 %)

Таблиця Г.1.10

Час завершення евакуації та шлях евакуації агентів

Значення даних	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (с)	27	27,9	51,3	39,7	6,9
M3 (с)	3	48,7	55,3	52,5	2,8
Шлях евакуації для всіх агентів (м)	30	45,3	54,3	49,3	2,4

Таблиця Г.1.11

Відстань руху агентів

Профіль	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (м)	27	45,3	54,3	49,2	2,5
M3 (м)	3	47,2	52	49,6	2,0

Таблиця Г.1.12

Пропускна здатність евакуаційного виходу

Вихід	Увійшов перший агент (с)	Увійшов останній агент (с)	Кількість агентів що використали (люд)	Середній потік (люд/с)
Евакуаційний вихід	27,9	55,3	30	1,09

Результати моделювання руху потоку агентів груп мобільності

M1 (96,67 %) та M4 (3,33 %)

Таблиця Г.1.13

Час завершення евакуації та шлях евакуації агентів

Значення даних	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (с)	29	27,9	48,1	38,7	5,7
M4 (с)	1	57,9	57,9	57,9	0
Шлях евакуації для всіх агентів (м)	30	45,2	56,5	49,5	2,7

Таблиця Г.1.14

Відстань руху агентів

Профіль	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (м)	29	45,3	56,5	49,6	2,7
M4 (м)	1	45,2	45,2	45,2	0

Таблиця Г.1.15

Пропускна здатність евакуаційного виходу

Вихід	Увійшов перший агент (с)	Увійшов останній агент (с)	Кількість агентів що використали (люд)	Середній потік (люд/с)
Евакуаційний вихід	27,9	57,9	30	1

Результати моделювання руху потоку агентів груп мобільності

M1 (93,33 %) та M4 (6,67 %)

Таблиця Г.1.16

Час завершення евакуації та шлях евакуації агентів

Значення даних	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (с)	28	27,9	46,8	37,5	5,3
M4 (с)	2	58,2	62,3	60,3	2
Шлях евакуації для всіх агентів (м)	30	44,4	55,5	48,9	2,7

Таблиця Г.1.17

Відстань руху агентів

Профіль	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (м)	28	45,2	55,5	48,9	2,7
M4 (м)	2	44,4	48,2	46,3	1,9

Таблиця Г.1.18

Пропускна здатність евакуаційного виходу

Вихід	Увійшов перший агент (с)	Увійшов останній агент (с)	Кількість агентів що використали (люд)	Середній потік (люд/с)
Евакуаційний вихід	27,9	62,3	30	0,87

Результати моделювання руху потоку агентів груп мобільності

M1 (90 %) та M4 (10 %)

Таблиця Г.1.19

Час завершення евакуації та шлях евакуації агентів

Значення даних	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (с)	27	26,4	45,7	36,4	5,6
M4 (с)	3	56,7	69,1	62,7	5,0
Шлях евакуації для всіх агентів (м)	30	42,8	53,8	48,3	3,3

Таблиця Г.1.20

Відстань руху агентів

Профіль	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (м)	27	42,8	53,8	48,4	3,2
M4 (м)	3	43,4	51,2	47,2	3,2

Таблиця Г.1.21

Пропускна здатність евакуаційного виходу

Вихід	Увійшов перший агент (с)	Увійшов останній агент (с)	Кількість агентів що використали (люд)	Середній потік (люд/с)
Евакуаційний вихід	26,4	69,1	30	0,7

Результати моделювання руху потоку агентів груп мобільності

M1 (90 %), M3 (3,33 %) та M4 (6,67 %)

Таблиця Г.1.22

Час завершення евакуації та шлях евакуації агентів

Значення даних	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (с)	27	27	46,2	37	5,6
M3 (с)	1	49,3	49,3	49,3	0,0
M4 (с)	2	59,4	63,3	61,3	1,9
Шлях евакуації для всіх агентів (м)	30	43,8	55,5	48,7	2,9

Таблиця Г.1.23

Відстань руху агентів

Профіль	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (м)	27	43,8	55,5	48,8	2,9
M3 (м)	1	50,7	50,7	50,7	0,0
M4 (м)	2	44,4	48,3	46,4	2,0

Таблиця Г.1.24

Пропускна здатність евакуаційного виходу

Вихід	Увійшов перший агент (с)	Увійшов останній агент (с)	Кількість агентів що використали (люд)	Середній потік (люд/с)
Евакуаційний вихід	27	63,3	30	0,83

Результати моделювання руху потоку агентів груп мобільності

M1 (90 %), M3 (6,67 %) та M4 (3,33 %)

Таблиця Г.1.25

Час завершення евакуації та шлях евакуації агентів

Значення даних	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (с)	27	27,9	47,9	38,4	5,7
M3 (с)	2	50,6	53,5	52	1,5
M4 (с)	1	60,7	60,7	60,7	0
Шлях евакуації для всіх агентів (м)	30	45,3	53,7	49,4	2,5

Таблиця Г.1.26

Відстань руху агентів

Профіль	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (м)	27	45,3	53,7	49,4	2,5
M3 (м)	2	49,4	52,5	50,9	1,5
M4 (м)	1	45,5	45,5	45,5	0

Таблиця Г.1.27

Пропускна здатність евакуаційного виходу

Вихід	Увійшов перший агент (с)	Увійшов останній агент (с)	Кількість агентів що використали (люд)	Середній потік (люд/с)
Евакуаційний вихід	27,9	60,7	30	0,91

Результати моделювання руху потоку агентів груп мобільності

M1 (93,33 %), M3 (3,335 %) та M4 (3,335 %)

Таблиця Г.1.28

Час завершення евакуації та шлях евакуації агентів

Значення даних	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (с)	28	27,9	48,6	39,1	6,2
M3 (с)	1	51,2	51,2	51,2	0
M4 (с)	1	59,8	59,8	59,8	0
Шлях евакуації для всіх агентів (м)	30	45,3	54,6	49,4	2,6

Таблиця Г.1.29

Відстань руху агентів

Профіль	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (м)	28	45,3	54,6	49,5	2,6
M3 (м)	1	48,9	48,9	48,9	0
M4 (м)	1	45,6	45,6	45,6	0

Таблиця Г.1.30

Пропускна здатність евакуаційного виходу

Вихід	Увійшов перший агент (с)	Увійшов останній агент (с)	Кількість агентів що використали (люд)	Середній потік (люд/с)
Евакуаційний вихід	27,9	59,8	30	0,94

**2 РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ
ДОСЛІДЖЕНЬ ВІДПОВІДНО ДО ЕМПІРИЧНИХ ДАНИХ ОТРИМАНИХ
ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ НАТУРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕВАКУАЦІЇ ЗМІШАНОГО ПОТОКУ ЛЮДЕЙ З
НАЯВНІСТЮ В НЬОМУ ОСІБ РІЗНИХ ГРУП МОБІЛЬНОСТІ**

Результати моделювання руху потоку агентів групи мобільності
M1 (100 %) без наявності в ньому маломобільних груп населення

Таблиця Г.2.1

Час завершення евакуації та шлях евакуації агентів

Значення даних	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (с)	30	25,4	44	34,8	5,2
Шлях евакуації для всіх агентів (м)	30	45,3	55	49,1	2,4

Таблиця Г.2.2

Відстань руху агентів

Профіль	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (м)	30	45,3	55	49,1	2,4

Таблиця Г.2.3

Пропускна здатність евакуаційного виходу

Вихід	Увійшов перший агент (с)	Увійшов останній агент (с)	Кількість агентів що використали (люд)	Середній потік (люд/с)
Евакуаційний вихід	25,4	44	30	1,61

Результати моделювання руху потоку агентів груп мобільності

M1 (96,67 %) та M3 (3,33 %)

Таблиця Г.2.4

Час завершення евакуації та шлях евакуації агентів

Значення даних	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (с)	29	29,1	50,6	41	6,1
M3 (с)	1	35,1	35,1	35,1	0
Шлях евакуації для всіх агентів (м)	30	45,3	54,3	49,4	2,6

Таблиця Г.2.5

Відстань руху агентів

Профіль	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (м)	29	45,3	54,3	49,5	2,5
M3 (м)	1	45,5	45,5	45,5	0

Таблиця Г.2.6

Пропускна здатність евакуаційного виходу

Вихід	Увійшов перший агент (с)	Увійшов останній агент (с)	Кількість агентів що використали (люд)	Середній потік (люд/с)
Евакуаційний вихід	29,1	50,6	30	1,39

Результати моделювання руху потоку агентів груп мобільності

M1 (93,33 %) та M3 (6,67 %)

Таблиця Г.2.7

Час завершення евакуації та шлях евакуації агентів

Значення даних	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (с)	28	32,4	55,5	45,7	6,8
M3 (с)	2	40,1	57	48,6	8,4
Шлях евакуації для всіх агентів (м)	30	45,3	54,2	49,3	2,4

Таблиця Г.2.8

Відстань руху агентів

Профіль	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (м)	28	45,3	54,2	49,4	2,4
M3 (м)	2	45,7	49,8	47,7	2,1

Таблиця Г.2.9

Пропускна здатність евакуаційного виходу

Вихід	Увійшов перший агент (с)	Увійшов останній агент (с)	Кількість агентів що використали (люд)	Середній потік (люд/с)
Евакуаційний вихід	32,4	57	30	1,22

Результати моделювання руху потоку агентів груп мобільності

M1 (90 %) та M3 (10 %)

Таблиця Г.2.10

Час завершення евакуації та шлях евакуації агентів

Значення даних	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (с)	27	33,8	56,7	47,2	6,5
M3 (с)	3	39,1	59,8	52,5	9,5
Шлях евакуації для всіх агентів (м)	30	45,3	55,5	49,6	2,6

Таблиця Г.2.11

Відстань руху агентів

Профіль	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (м)	27	45,3	53,9	49,5	2,4
M3 (м)	3	46,1	55,5	50,9	3,8

Таблиця Г.2.12

Пропускна здатність евакуаційного виходу

Вихід	Увійшов перший агент (с)	Увійшов останній агент (с)	Кількість агентів що використали (люд)	Середній потік (люд/с)
Евакуаційний вихід	33,8	59,8	30	1,16

Результати моделювання руху потоку агентів груп мобільності

M1 (96,67 %) та M4 (3,33 %)

Таблиця Г.2.13

Час завершення евакуації та шлях евакуації агентів

Значення даних	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (с)	29	38,2	62,1	51,2	6,7
M4 (с)	1	68,5	68,5	68,5	0
Шлях евакуації для всіх агентів (м)	30	45,3	53,6	49,1	2,1

Таблиця Г.2.14

Відстань руху агентів

Профіль	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (м)	29	45,3	53,6	49,1	2,1
M4 (м)	1	47,3	47,3	47,3	0

Таблиця Г.2.15

Пропускна здатність евакуаційного виходу

Вихід	Увійшов перший агент (с)	Увійшов останній агент (с)	Кількість агентів що використали (люд)	Середній потік (люд/с)
Евакуаційний вихід	38,2	68,5	30	0,99

Результати моделювання руху потоку агентів груп мобільності

M1 (93,33 %) та M4 (6,67 %)

Таблиця Г.2.16

Час завершення евакуації та шлях евакуації агентів

Значення даних	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (с)	28	32,5	54,5	44,1	6,1
M4 (с)	2	59,2	65,2	62,2	3
Шлях евакуації для всіх агентів (м)	30	45,3	56,3	49,5	2,8

Таблиця Г.2.17

Відстань руху агентів

Профіль	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (м)	28	45,3	56,3	49,5	2,8
M4 (м)	2	45,8	52	48,9	3,1

Таблиця Г.2.18

Пропускна здатність евакуаційного виходу

Вихід	Увійшов перший агент (с)	Увійшов останній агент (с)	Кількість агентів що використали (люд)	Середній потік (люд/с)
Евакуаційний вихід	32,5	65,2	30	0,92

Результати моделювання руху потоку агентів груп мобільності

M1 (90 %) та M4 (10 %)

Таблиця Г.2.19

Час завершення евакуації та шлях евакуації агентів

Значення даних	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (с)	27	29,9	50,2	407	5,8
M4 (с)	3	54,7	65,1	59,6	4,3
Шлях евакуації для всіх агентів (м)	30	42,8	54,6	48,4	3,3

Таблиця Г.2.20

Відстань руху агентів

Профіль	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (м)	27	42,8	54,6	48,3	3,3
M4 (м)	3	45	51,4	49,1	2,9

Таблиця Г.2.21

Пропускна здатність евакуаційного виходу

Вихід	Увійшов перший агент (с)	Увійшов останній агент (с)	Кількість агентів що використали (люд)	Середній потік (люд/с)
Евакуаційний вихід	29,9	65,1	30	0,85

Результати моделювання руху потоку агентів груп мобільності

M1 (90 %), M3 (3,33 %) та M4 (6,67 %)

Таблиця Г.2.22

Час завершення евакуації та шлях евакуації агентів

Значення даних	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (с)	27	33,2	67,7	47,4	9,6
M3 (с)	1	68,9	68,9	68,9	0
M4 (с)	2	65,1	72,1	68,6	3,5
Шлях евакуації для всіх агентів (м)	30	43,8	55,5	49,3	3,4

Таблиця Г.2.23

Відстань руху агентів

Профіль	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (м)	27	43,8	55,5	49	3,2
M3 (м)	1	54,9	54,9	54,9	0
M4 (м)	2	45,2	53,7	49,4	4,3

Таблиця Г.2.24

Пропускна здатність евакуаційного виходу

Вихід	Увійшов перший агент (с)	Увійшов останній агент (с)	Кількість агентів що використали (люд)	Середній потік (люд/с)
Евакуаційний вихід	33,2	72,1	30	0,77

Результати моделювання руху потоку агентів груп мобільності

M1 (90 %), M3 (6,67 %) та M4 (3,33 %)

Таблиця Г.2.25

Час завершення евакуації та шлях евакуації агентів

Значення даних	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (с)	27	29,8	54,2	41,4	7,1
M3 (с)	2	55,8	57,5	56,6	0,9
M4 (с)	1	50,1	50,1	50,1	0
Шлях евакуації для всіх агентів (м)	30	45,3	54,5	49,6	2,7

Таблиця Г.2.26

Відстань руху агентів

Профіль	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (м)	27	45,3	54,4	49,5	2,6
M3 (м)	2	51,1	54,5	52,8	1,7
M4 (м)	1	46	46	46	0

Таблиця Г.2.27

Пропускна здатність евакуаційного виходу

Вихід	Увійшов перший агент (с)	Увійшов останній агент (с)	Кількість агентів що використали (люд)	Середній потік (люд/с)
Евакуаційний вихід	29,8	57,5	30	1,08

Результати моделювання руху потоку агентів груп мобільності

M1 (93,33 %), M3 (3,335 %) та M4 (3,335 %)

Таблиця Г.2.28

Час завершення евакуації та шлях евакуації агентів

Значення даних	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (с)	28	32,6	59,9	47,1	8,7
M3 (с)	1	61,9	61,9	61,9	0
M4 (с)	1	51,2	51,2	51,2	0
Шлях евакуації для всіх агентів (м)	30	45,3	55,5	49,8	2,9

Таблиця Г.2.29

Відстань руху агентів

Профіль	Кількість агентів	Мінімум	Максимум	Середнє	Стандартне відхилення
M1 (м)	28	45,3	55,5	49,8	2,9
M3 (м)	1	52,5	52,5	52,5	0
M4 (м)	1	46,3	46,3	46,3	0

Таблиця Г.2.30

Пропускна здатність евакуаційного виходу

Вихід	Увійшов перший агент (с)	Увійшов останній агент (с)	Кількість агентів що використали (люд)	Середній потік (люд/с)
Евакуаційний вихід	32,6	61,9	30	1,03

ДОДАТОК Д

Динаміка виходу та швидкість потоку агентів крізь евакуаційний вихід

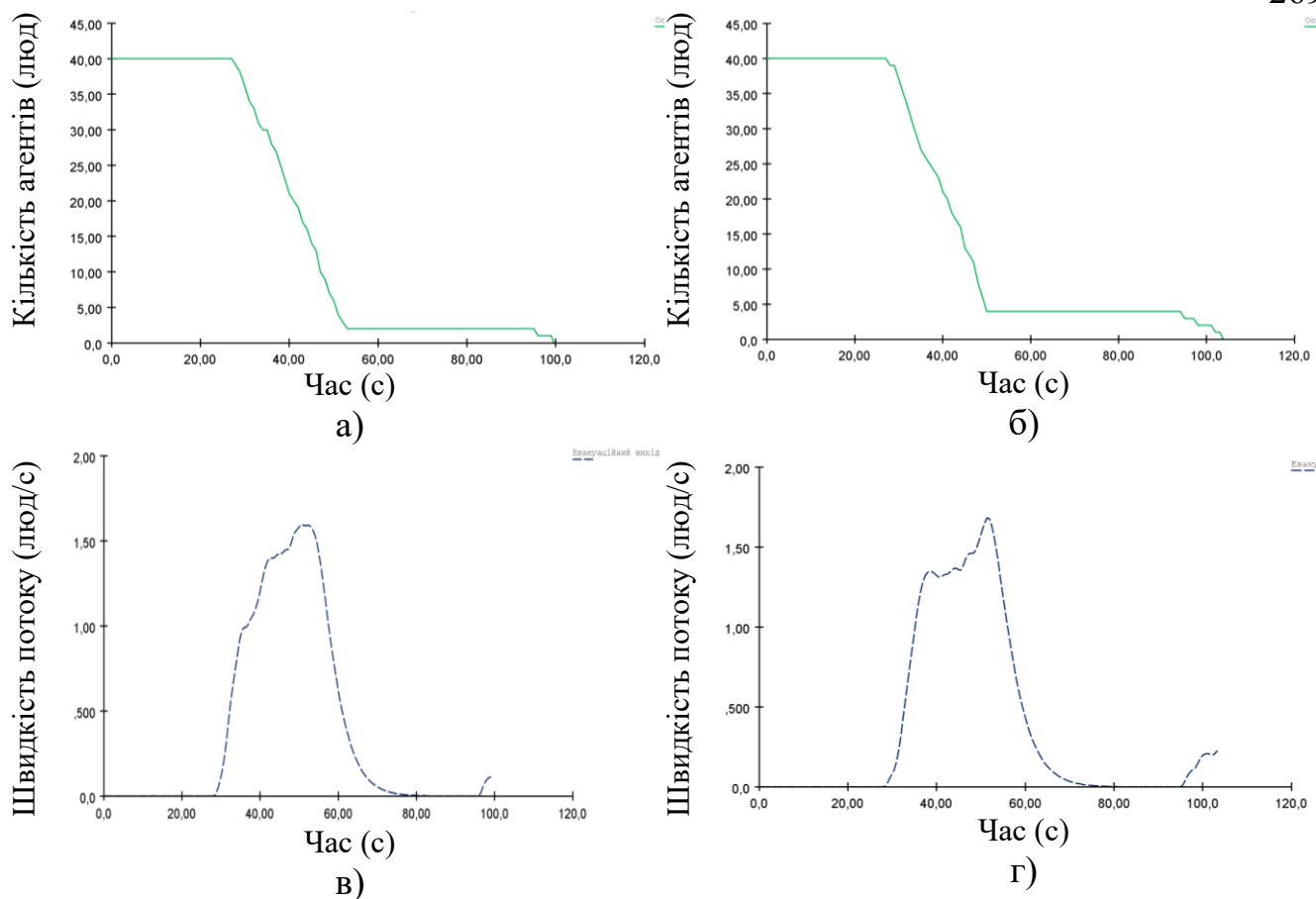


Рисунок Д.1 – Динаміка виходу та швидкість потоку до складу якого входять агенти груп мобільності M1 та M2: а) – залежність кількості агентів груп мобільності M1 (95 %) та M2 (5 %) від часу на евакуаційному шляху; б) – залежність кількості агентів груп мобільності M1 (90 %) та M2 (10 %) від часу на евакуаційному шляху; в) – залежність швидкості потоку агентів груп мобільності M1 (95 %) та M2 (5 %) від часу на евакуаційному виході; г) – залежність швидкості потоку агентів груп мобільності M1 (90 %) та M2 (10 %) від часу на евакуаційному виході.

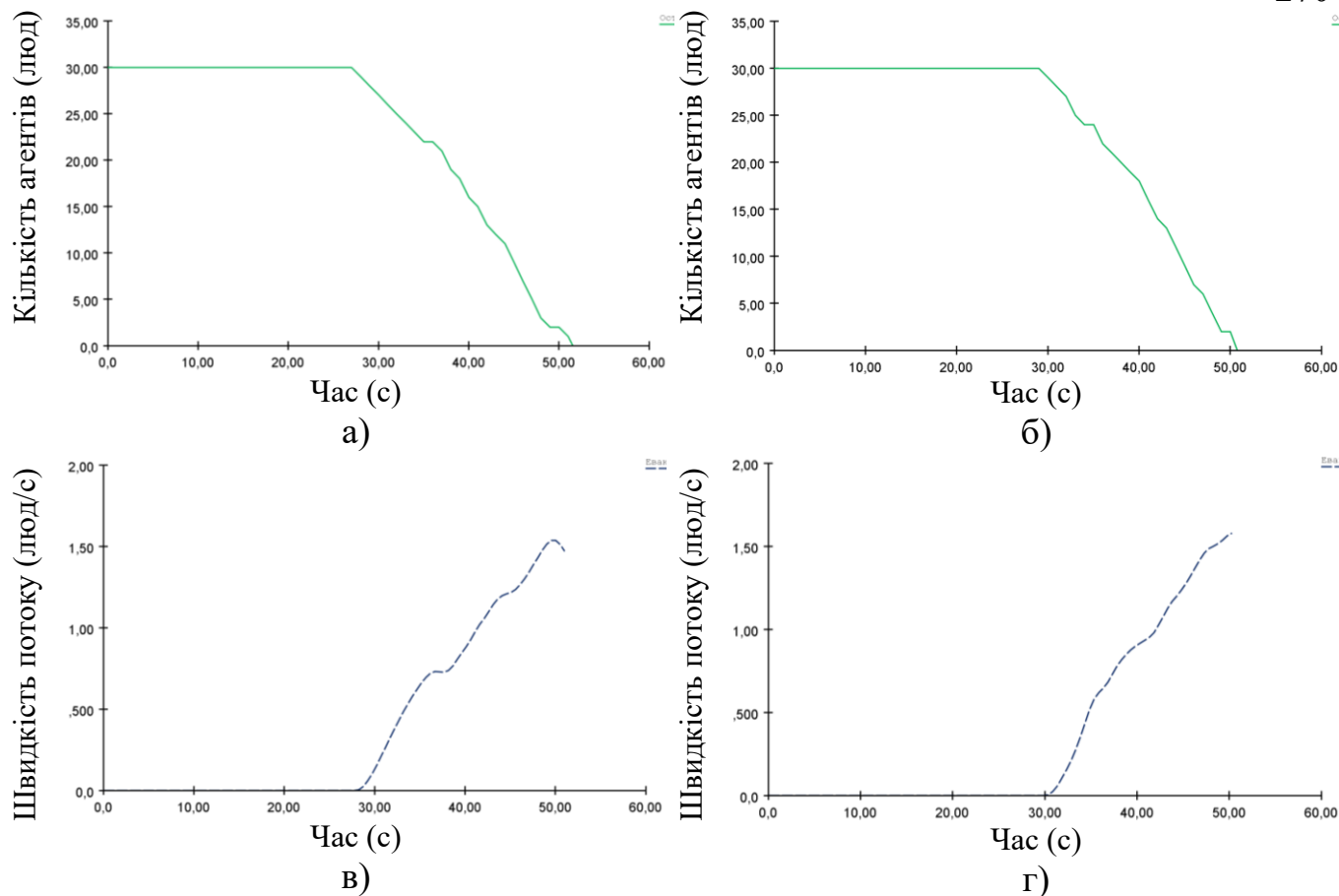


Рисунок Д.2 – Динаміка виходу та швидкість потоку до складу якого входять агенти груп мобільності М1 та М3: а) – залежність кількості агентів груп мобільності М1 (96,67 %) та М3 (3,33 %) від часу на евакуаційному шляху відповідно до ДСТУ 8828:2019; б) – залежність швидкості потоку агентів груп мобільності М1 (96,67 %) та М3 (3,33 %) від часу на евакуаційному виході згідно з даними натурного експерименту; в) – залежність кількості агентів груп мобільності М1 (96,67 %) та М3 (3,33 %) від часу на евакуаційному шляху відповідно до ДСТУ 8828:2019; г) – залежність швидкості потоку агентів груп мобільності М1 (96,67 %) та М3 (3,33 %) від часу на евакуаційному виході згідно з даними натурного експерименту

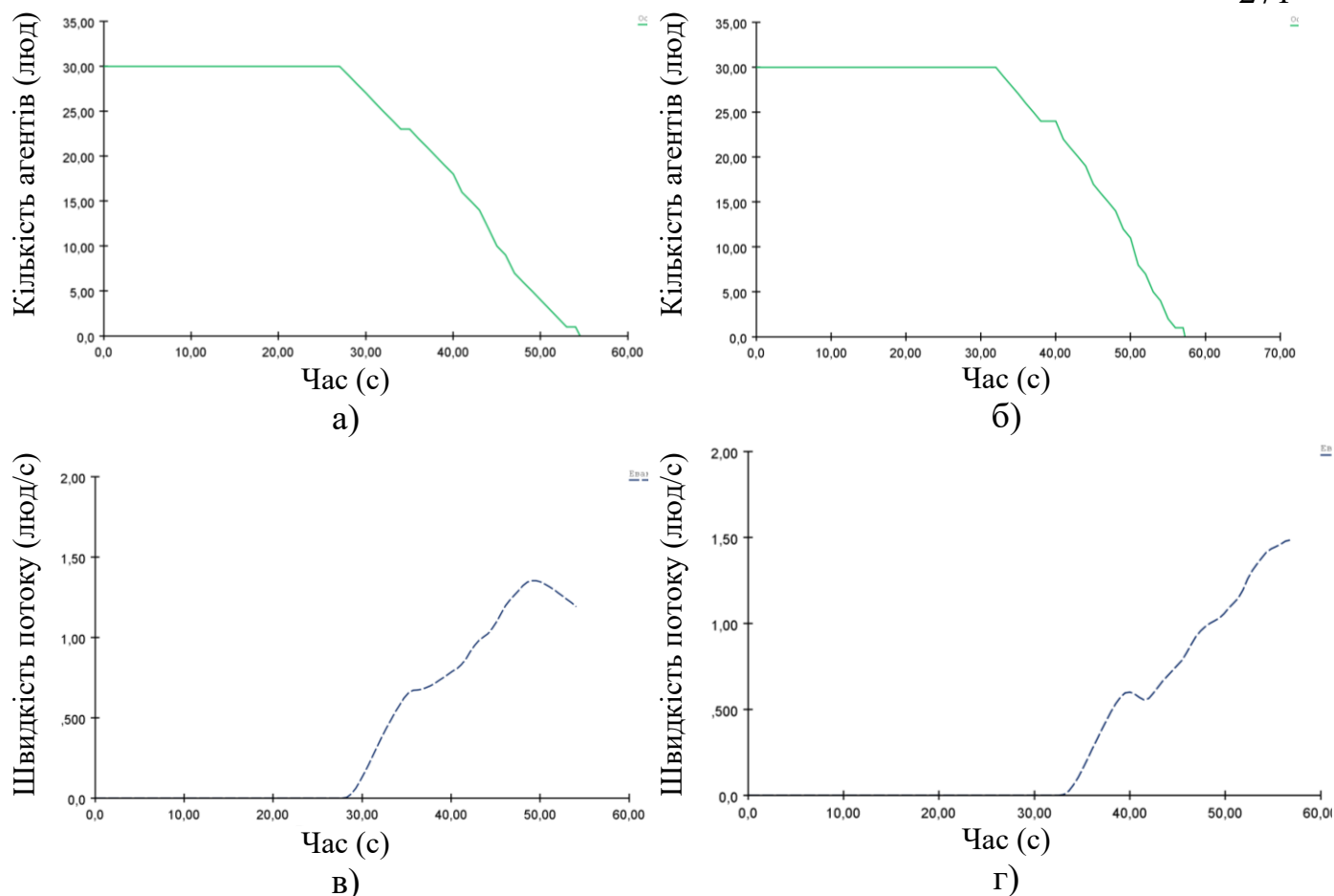


Рисунок Д.3 – Динаміка виходу та швидкість потоку до складу якого входять агенти груп мобільності М1 та М3: а) – залежність кількості агентів груп мобільності М1 (93,33 %) та М3 (6,67 %) від часу на евакуаційному шляху відповідно до ДСТУ 8828:2019; б) – залежність швидкості потоку агентів груп мобільності М1 (93,33 %) та М3 (6,67 %) від часу на евакуаційному виході згідно з даними натурного експерименту; в) – залежність кількості агентів груп мобільності М1 (93,33 %) та М3 (6,67 %) від часу на евакуаційному шляху відповідно до ДСТУ 8828:2019; г) – залежність швидкості потоку агентів груп мобільності М1 (93,33 %) та М3 (6,67 %) від часу на евакуаційному виході згідно з даними натурного експерименту

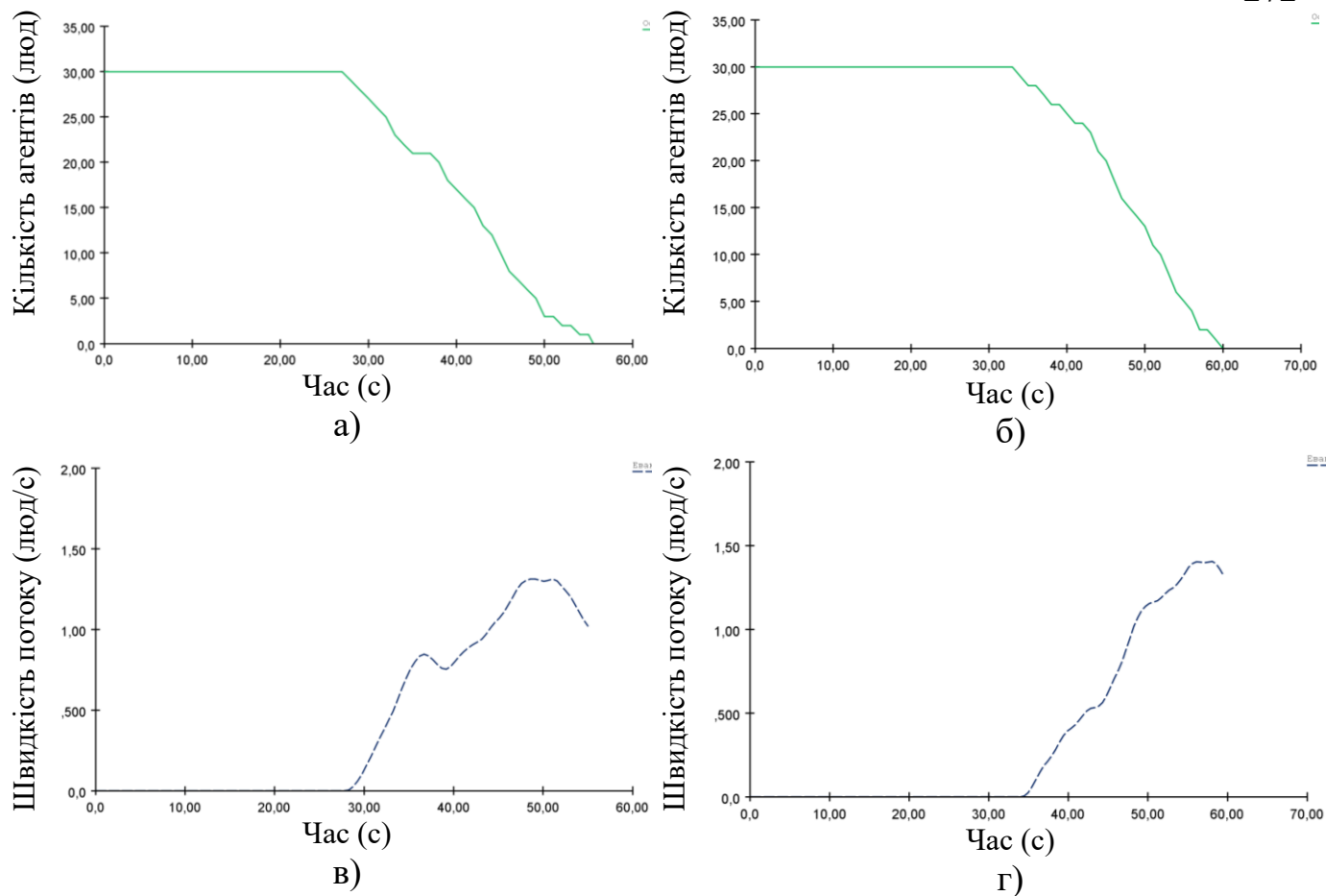


Рисунок Д. 4 – Динаміка виходу та швидкість потоку до складу якого входять агенти груп мобільності М1 та М3: а) – залежність кількості агентів груп мобільності М1 (90 %) та М3 (10 %) від часу на евакуаційному шляху відповідно до ДСТУ 8828:2019; б) – залежність швидкості потоку агентів груп мобільності М1 (90 %) та М3 (10 %) від часу на евакуаційному виході згідно з даними натурного експерименту; в) – залежність кількості агентів груп мобільності М1 (90 %) та М3 (10 %) від часу на евакуаційному шляху відповідно до ДСТУ 8828:2019; г) – залежність швидкості потоку агентів груп мобільності М1 (90 %) та М3 (10 %) від часу на евакуаційному виході згідно з даними натурного експерименту

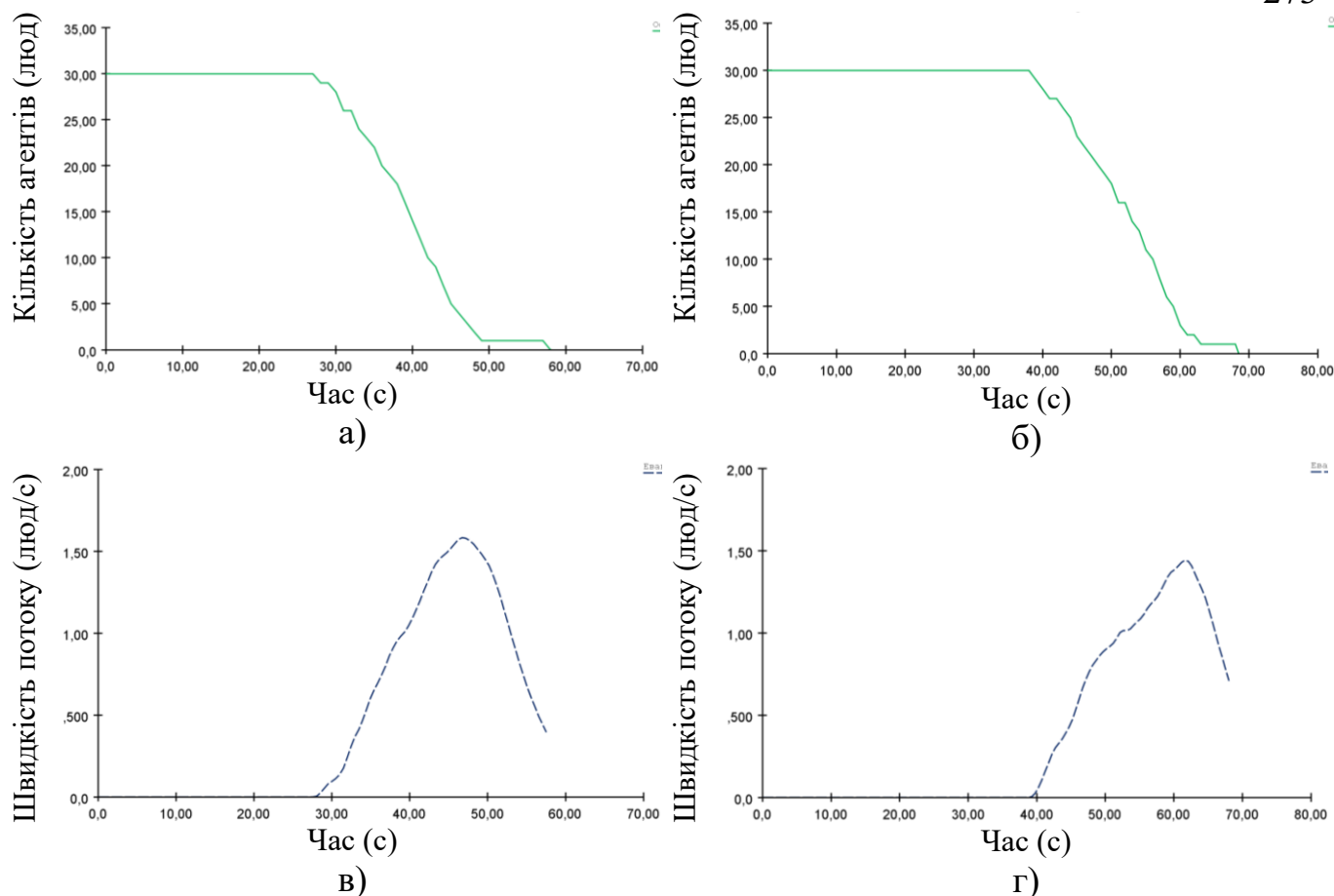


Рисунок Д. 5 – Динаміка виходу та швидкість потоку до складу якого входять агенти груп мобільності M1 та M4: а) – залежність кількості агентів груп мобільності M1 (96,67 %) та M4 (3,33 %) від часу на евакуаційному шляху відповідно до ДСТУ 8828:2019; б) – залежність швидкості потоку агентів груп мобільності M1 (96,67 %) та M4 (3,33 %) від часу на евакуаційному виході згідно з даними натурного експерименту; в) – залежність кількості агентів груп мобільності M1 (96,67 %) та M4 (3,33 %) від часу на евакуаційному шляху відповідно до ДСТУ 8828:2019; г) – залежність швидкості потоку агентів груп мобільності M1 (96,67 %) та M4 (3,33 %) від часу на евакуаційному виході згідно з даними натурного експерименту

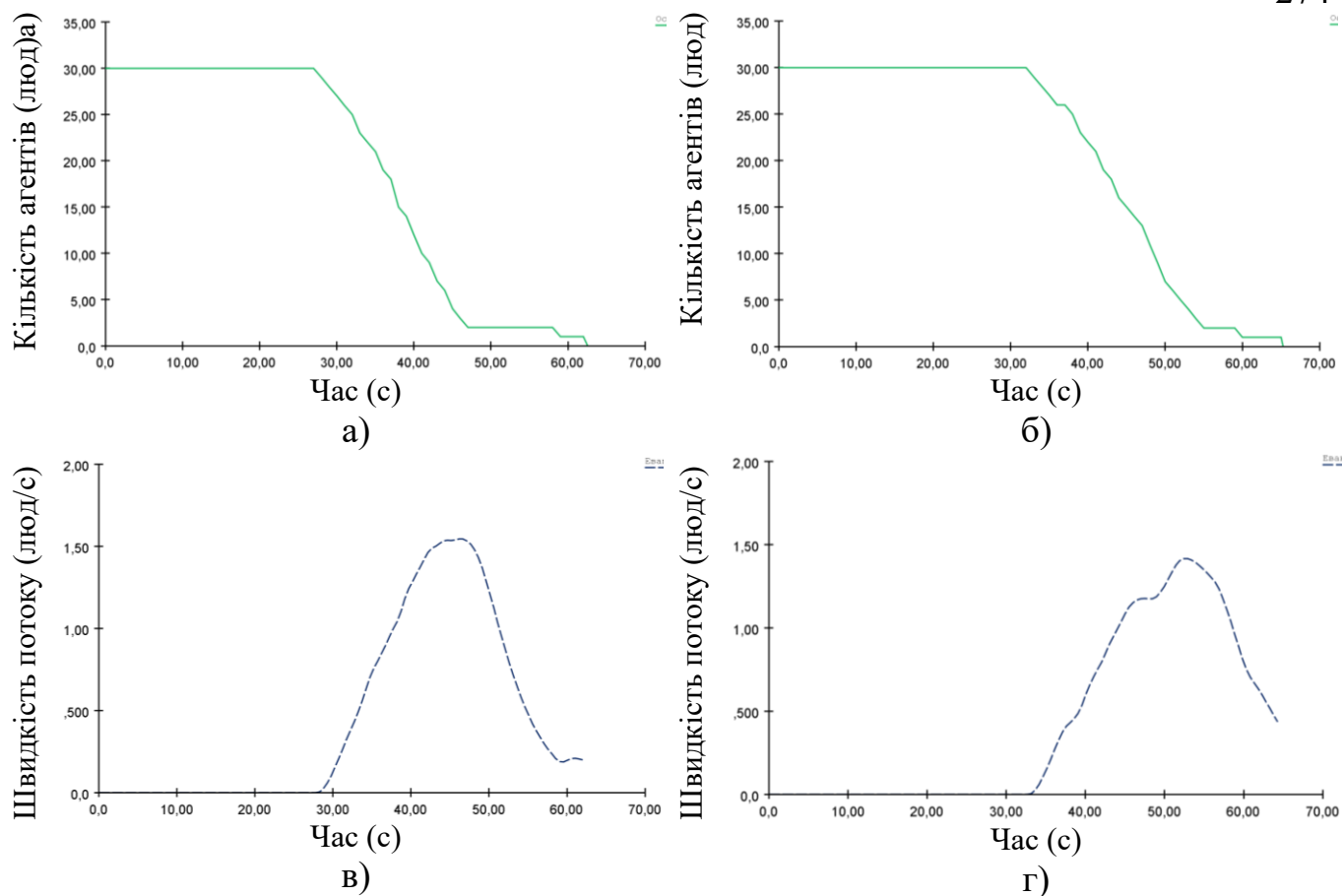


Рисунок Д. 6 – Динаміка виходу та швидкість потоку до складу якого входять агенти груп мобільності М1 та М4: а) – залежність кількості агентів груп мобільності М1 (93,33 %) та М4 (6,67 %) від часу на евакуаційному шляху відповідно до ДСТУ 8828:2019; б) – залежність швидкості потоку агентів груп мобільності М1 (93,33 %) та М4 (6,67 %) від часу на евакуаційному виході згідно з даними натурного експерименту; в) – залежність кількості агентів груп мобільності М1 (93,33 %) та М4 (6,67 %) від часу на евакуаційному шляху відповідно до ДСТУ 8828:2019; г) – залежність швидкості потоку агентів груп мобільності М1 (93,33 %) та М4 (6,67 %) від часу на евакуаційному виході згідно з даними натурного експерименту

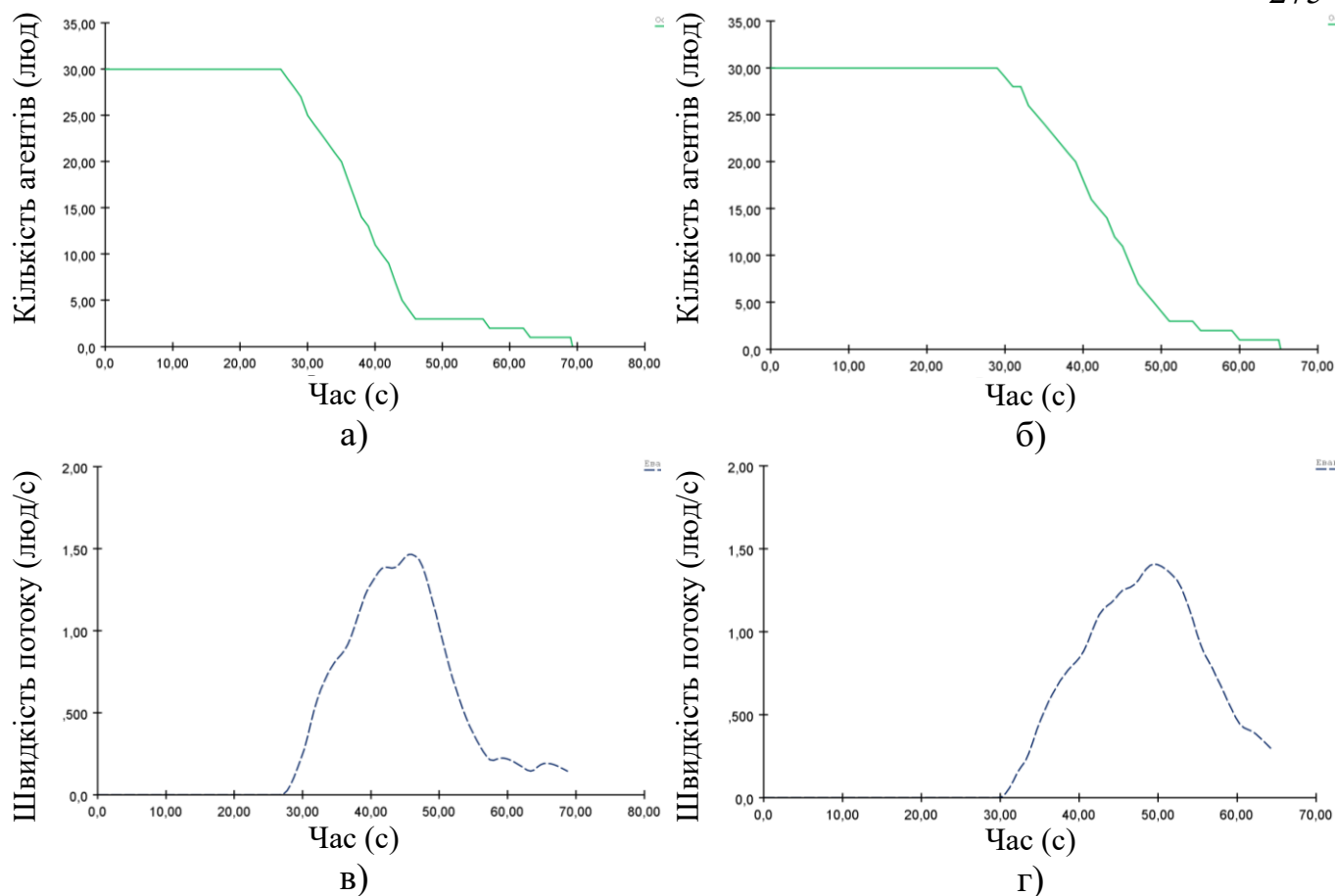


Рисунок Д. 7 – Динаміка виходу та швидкість потоку до складу якого входять агенти груп мобільності М1 та М4: а) – залежність кількості агентів груп мобільності М1 (90%) та М4 (10 %) від часу на евакуаційному шляху відповідно до ДСТУ 8828:2019; б) – залежність швидкості потоку агентів груп мобільності М1 (90 %) та М4 (10 %) від часу на евакуаційному виході згідно з даними натурного експерименту; в) – залежність кількості агентів груп мобільності М1 (90%) та М4 (10%) від часу на евакуаційному шляху відповідно до ДСТУ 8828:2019; г) – залежність швидкості потоку агентів груп мобільності М1 (90 %) та М4 (10 %) від часу на евакуаційному виході згідно з даними натурного експерименту

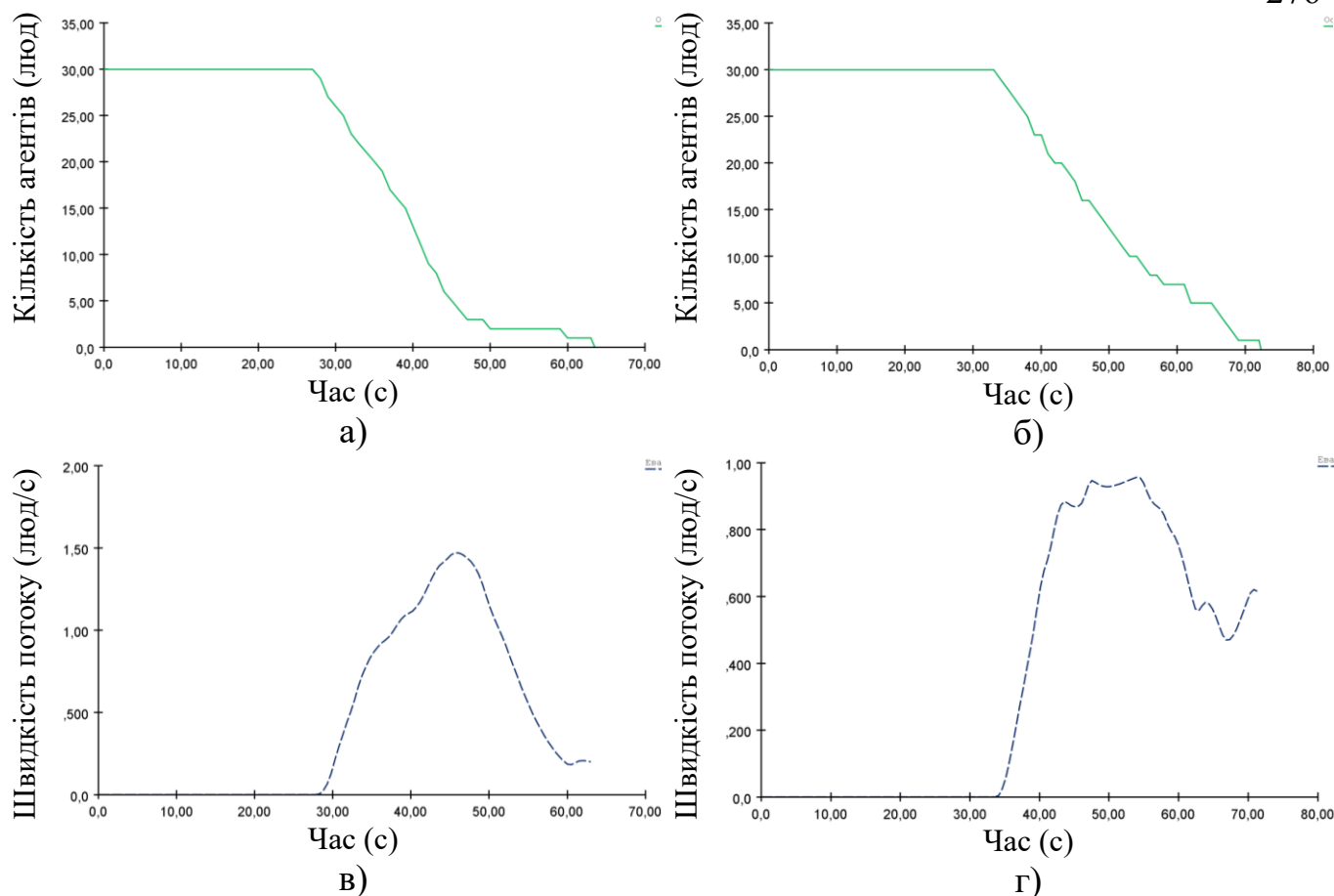


Рисунок Д. 8 – Динаміка виходу та швидкість потоку до складу якого входять агенти груп мобільності М1 та М4: а) – залежність кількості агентів груп мобільності М1 (90 %), М3 (3,33 %) та М4 (6,67 %) від часу на евакуаційному шляху відповідно до ДСТУ 8828:2019; б) – залежність швидкості потоку агентів груп мобільності М1 (90 %), М3 (3,33 %) та М4 (6,67 %) від часу на евакуаційному виході згідно з даними натурного експерименту; в) – залежність кількості агентів груп мобільності М1 (90 %), М3 (3,33 %) та М4 (6,67 %) від часу на евакуаційному шляху відповідно до ДСТУ 8828:2019; г) – залежність швидкості потоку агентів груп мобільності М1 (90 %), М3 (3,33 %) та М4 (6,67 %) від часу на евакуаційному виході згідно з даними натурного експерименту

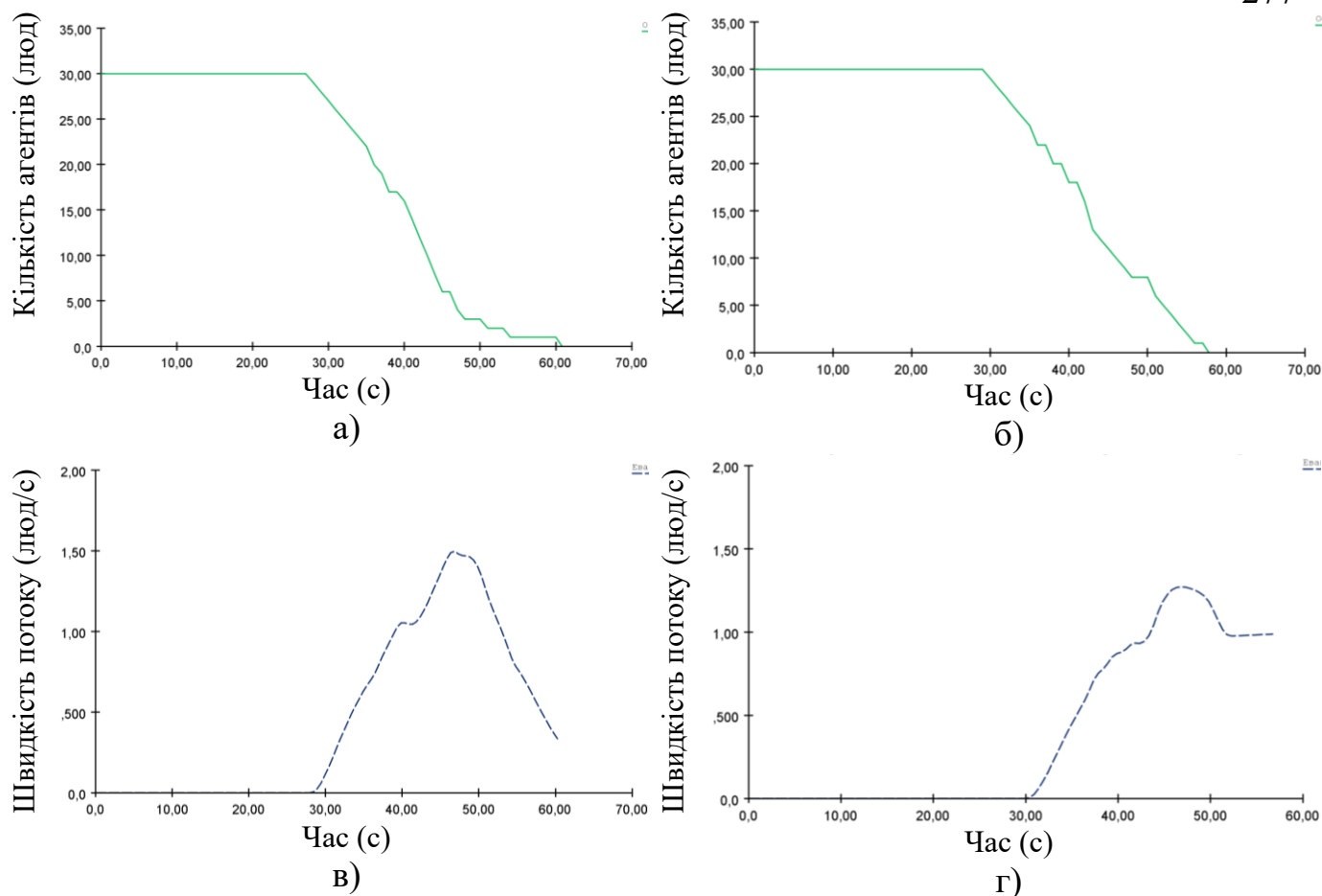


Рисунок Д. 9 – Динаміка виходу та швидкість потоку до складу якого входять агенти груп мобільності М1 та М4: а) – залежність кількості агентів груп мобільності М1 (90 %), М3 (6,67 %) та М4 (3,33 %) від часу на евакуаційному шляху відповідно до ДСТУ 8828:2019; б) – залежність швидкості потоку агентів груп мобільності М1 (90 %), М3 (6,67 %) та М4 (3,33 %) від часу на евакуаційному виході згідно з даними натурного експерименту; в) – залежність кількості агентів груп мобільності М1 (90 %), М3 (6,67 %) та М4 (3,33 %) від часу на евакуаційному шляху відповідно до ДСТУ 8828:2019; г) – залежність швидкості потоку агентів груп мобільності М1 (90 %), М3 (6,67 %) та М4 (3,33 %) від часу на евакуаційному виході згідно з даними натурного експерименту

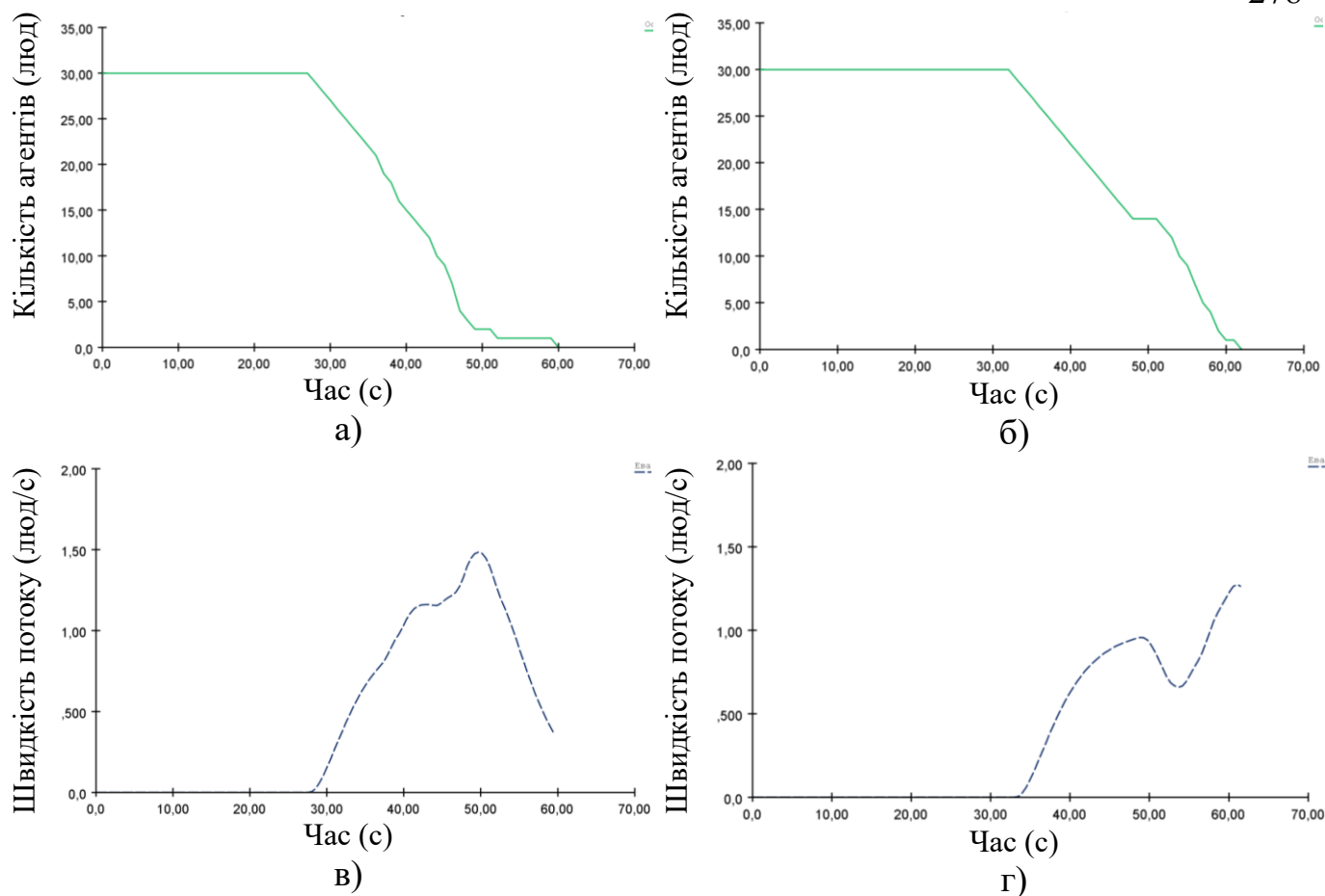


Рисунок Д. 10 – Динаміка виходу та швидкість потоку до складу якого входять агенти груп мобільності М1 та М4: а) – залежність кількості агентів груп мобільності М1 (93,33 %), М3 (3,335 %) та М4 (3,335 %) від часу на евакуаційному шляху відповідно до ДСТУ 8828:2019; б) – залежність швидкості потоку агентів груп мобільності М1 М1 (93,33 %), М3 (3,335 %) та М4 (3,335 %) від часу на евакуаційному виході згідно з даними натурного експерименту; в) – залежність кількості агентів груп мобільності М1 (93,33 %), М3 (3,335 %) та М4 (3,335 %) від часу на евакуаційному шляху відповідно до ДСТУ 8828:2019; г) – залежність швидкості потоку агентів груп М1 (93,33 %), М3 (3,335 %) та М4 (3,335 %) від часу на евакуаційному виході згідно з даними натурного експерименту.

ДОДАТОК Е

Зведені результати регресійного аналізу даних

Зведені результати регресійного аналізу даних

<i>x1</i>	<i>x2</i>	<i>x3</i>	<i>x12</i>	<i>x13</i>	<i>x23</i>	<i>x123</i>	<i>Y</i>	<i>Y_{прогнозоване}</i>
0,04	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	105,00	92,15034756
0,05	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	102,00	91,32010525
0,09	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	93,00	87,99913602
0,09	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	90,00	87,99913602
0,11	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	90,00	86,33865141
0,12	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	90,00	85,5084091
0,14	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	80,40	83,84792448
0,15	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	80,40	83,01768218
0,16	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	80,40	82,18743987
0,20	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	80,40	78,86647064
0,22	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	89,42	77,46638494
0,25	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	83,33	74,68768637
0,26	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	83,72	73,62003902
0,27	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	82,58	72,84198768
0,30	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	82,51	70,84791103
0,33	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	78,49	68,19433708
0,34	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	78,58	67,1909499
0,35	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	77,18	66,46732494
0,37	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	76,89	64,52013696
0,40	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	71,92	61,97604747
0,42	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	71,90	61,00162318
0,42	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	70,40	60,3042067
0,48	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	64,59	55,8973098
0,49	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	64,51	54,9400596
0,50	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	62,95	54,25861434
0,55	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	56,79	49,90596388
0,56	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	56,67	48,96028895
0,57	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	55,08	48,28977192
0,59	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	54,60	46,391678
0,62	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	48,69	43,9754222
0,63	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	48,54	43,0381568
0,64	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	46,92	42,37565572
0,66	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	46,41	40,4852123
0,69	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	40,35	38,08998624
0,70	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	40,18	37,15913967
0,71	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	38,54	36,5027977
0,73	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	39,32	34,66935382
0,73	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	38,02	34,61826955
0,76	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	31,84	32,23948929
0,77	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	31,66	31,31371627
0,78	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	30,6622662

0,80	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	30,69	28,83811973
0,80	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	29,46	28,78245803
0,81	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	31,99	28,16916536
0,04	3,330	0,000	0,14	0,00	0,00	0,00	86,65	82,92172702
0,04	3,330	0,000	0,15	0,00	0,00	0,00	88,79	82,83947387
0,05	3,330	0,000	0,15	0,00	0,00	0,00	90,00	82,77086376
0,09	3,330	0,000	0,29	0,00	0,00	0,00	80,00	79,50478118
0,09	3,330	0,000	0,30	0,00	0,00	0,00	81,47	79,24798167
0,09	3,330	0,000	0,31	0,00	0,00	0,00	80,00	79,17937156
0,11	3,330	0,000	0,35	0,00	0,00	0,00	76,67	78,09915928
0,11	3,330	0,000	0,36	0,00	0,00	0,00	76,67	77,78866069
0,13	3,330	0,000	0,42	0,00	0,00	0,00	70,00	76,46369258
0,15	3,330	0,000	0,51	0,00	0,00	0,00	70,00	74,42541394
0,19	3,330	0,000	0,65	0,00	0,00	0,00	69,03	71,1420056
0,21	3,330	0,000	0,71	0,00	0,00	0,00	67,84	69,69792811
0,22	3,330	0,000	0,73	0,00	0,00	0,00	69,83	69,22591393
0,24	3,330	0,000	0,80	0,00	0,00	0,00	64,49	67,60096124
0,27	3,330	0,000	0,88	0,00	0,00	0,00	63,26	65,68786892
0,27	3,330	0,000	0,91	0,00	0,00	0,00	66,65	65,1299871
0,29	3,330	0,000	0,97	0,00	0,00	0,00	66,27	63,68642616
0,29	3,330	0,000	0,97	0,00	0,00	0,00	62,36	63,61215655
0,30	3,330	0,000	1,00	0,00	0,00	0,00	62,05	63,01664227
0,31	3,330	0,000	1,02	0,00	0,00	0,00	64,24	62,52419804
0,31	3,330	0,000	1,03	0,00	0,00	0,00	65,63	62,25660576
0,33	3,330	0,000	1,09	0,00	0,00	0,00	59,81	60,790866
0,35	3,330	0,000	1,17	0,00	0,00	0,00	58,20	59,00718043
0,36	3,330	0,000	1,19	0,00	0,00	0,00	61,27	58,55756824
0,37	3,330	0,000	1,24	0,00	0,00	0,00	60,02	57,4078822
0,38	3,330	0,000	1,25	0,00	0,00	0,00	56,71	57,13226031
0,38	3,330	0,000	1,27	0,00	0,00	0,00	56,17	56,61710858
0,39	3,330	0,000	1,28	0,00	0,00	0,00	57,82	56,30334151
0,39	3,330	0,000	1,29	0,00	0,00	0,00	59,06	56,0878186
0,41	3,330	0,000	1,35	0,00	0,00	0,00	53,11	54,6693927
0,43	3,330	0,000	1,43	0,00	0,00	0,00	51,36	52,92895057
0,43	3,330	0,000	1,45	0,00	0,00	0,00	54,32	52,51906404
0,45	3,330	0,000	1,49	0,00	0,00	0,00	52,70	51,49536665
0,45	3,330	0,000	1,51	0,00	0,00	0,00	49,65	51,13041573
0,46	3,330	0,000	1,53	0,00	0,00	0,00	49,00	50,64923118
0,46	3,330	0,000	1,54	0,00	0,00	0,00	50,41	50,41876914
0,46	3,330	0,000	1,54	0,00	0,00	0,00	51,57	50,229452
0,48	3,330	0,000	1,60	0,00	0,00	0,00	45,55	48,835665
0,50	3,330	0,000	1,68	0,00	0,00	0,00	43,73	47,11844276
0,51	3,330	0,000	1,69	0,00	0,00	0,00	46,62	46,73048605

0,52	3,330	0,000	1,74	0,00	0,00	0,00	44,79	45,78041779
0,53	3,330	0,000	1,78	0,00	0,00	0,00	42,45	44,72091136
0,54	3,330	0,000	1,79	0,00	0,00	0,00	43,56	44,54789536
0,58	3,33	0,00	1,94	0,00	0,00	0,00	38,48	41,09363982
0,59	3,33	0,00	1,97	0,00	0,00	0,00	36,50	40,19295395
0,61	3,33	0,00	2,03	0,00	0,00	0,00	35,21	38,98345761
0,08	6,67	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	80,00	71,66985971
0,09	6,67	0,00	0,60	0,00	0,00	0,00	65,00	70,59071127
0,10	6,67	0,00	0,64	0,00	0,00	0,00	70,00	70,1204053
0,11	6,67	0,00	0,73	0,00	0,00	0,00	65,00	69,14049978
0,11	6,67	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	60,00	69,00505986
0,16	6,67	0,00	1,07	0,00	0,00	0,00	60,00	65,43595448
0,18	6,67	0,00	1,21	0,00	0,00	0,00	50,00	63,95254079
0,20	6,67	0,00	1,34	0,00	0,00	0,00	58,84	62,60278353
0,25	6,67	0,00	1,64	0,00	0,00	0,00	47,02	59,27691341
0,25	6,67	0,00	1,65	0,00	0,00	0,00	61,33	59,20709627
0,25	6,67	0,00	1,69	0,00	0,00	0,00	53,51	58,74454167
0,26	6,67	0,00	1,71	0,00	0,00	0,00	47,02	58,56955762
0,26	6,67	0,00	1,71	0,00	0,00	0,00	48,98	58,49739692
0,27	6,67	0,00	1,81	0,00	0,00	0,00	52,98	57,39881855
0,30	6,67	0,00	2,03	0,00	0,00	0,00	51,39	55,10161023
0,31	6,67	0,00	2,07	0,00	0,00	0,00	43,50	54,6389256
0,33	6,67	0,00	2,19	0,00	0,00	0,00	42,93	53,293126
0,36	6,67	0,00	2,40	0,00	0,00	0,00	41,75	51,06561252
0,36	6,67	0,00	2,40	0,00	0,00	0,00	41,25	50,99564247
0,39	6,67	0,00	2,57	0,00	0,00	0,00	32,73	49,18681447
0,59	6,67	0,00	3,92	0,00	0,00	0,00	24,00	34,52342143
0,62	6,67	0,00	4,11	0,00	0,00	0,00	24,36	32,47772291
0,64	6,67	0,00	4,25	0,00	0,00	0,00	23,73	30,90424713
0,65	6,67	0,00	4,31	0,00	0,00	0,00	25,16	30,24166794
0,67	6,67	0,00	4,46	0,00	0,00	0,00	20,68	28,63724788
0,69	6,67	0,00	4,59	0,00	0,00	0,00	20,99	27,23377514
0,71	6,67	0,00	4,77	0,00	0,00	0,00	20,59	25,30322599
0,73	6,67	0,00	4,84	0,00	0,00	0,00	18,36	24,46267356
0,74	6,67	0,00	4,96	0,00	0,00	0,00	20,58	23,18876412
0,78	6,67	0,00	5,23	0,00	0,00	0,00	16,02	20,24123528
0,81	6,67	0,00	5,37	0,00	0,00	0,00	15,60	18,68902615
0,82	6,67	0,00	5,48	0,00	0,00	0,00	14,92	17,54142365
0,83	6,67	0,00	5,54	0,00	0,00	0,00	14,82	16,91438466
0,84	6,67	0,00	5,59	0,00	0,00	0,00	14,89	16,3060309
0,86	6,67	0,00	5,74	0,00	0,00	0,00	14,05	14,75050108
0,05	10,00	0,00	0,52	0,00	0,00	0,00	76,37	64,43913542
0,11	10,00	0,00	1,06	0,00	0,00	0,00	65,00	60,85038554

0,11	10,00	0,00	1,08	0,00	0,00	0,00	70,00	60,67112743
0,11	10,00	0,00	1,10	0,00	0,00	0,00	60,00	60,55431613
0,12	10,00	0,00	1,20	0,00	0,00	0,00	60,00	59,85473644
0,12	10,00	0,00	1,23	0,00	0,00	0,00	60,00	59,67547833
0,13	10,00	0,00	1,29	0,00	0,00	0,00	63,33	59,25509315
0,13	10,00	0,00	1,33	0,00	0,00	0,00	63,33	59,03286999
0,17	10,00	0,00	1,73	0,00	0,00	0,00	50,00	56,33718905
0,18	10,00	0,00	1,76	0,00	0,00	0,00	55,00	56,12205965
0,23	10,00	0,00	2,33	0,00	0,00	0,00	59,73	52,26157071
0,24	10,00	0,00	2,36	0,00	0,00	0,00	63,02	52,05324095
0,26	10,00	0,00	2,58	0,00	0,00	0,00	51,88	50,62268222
0,26	10,00	0,00	2,62	0,00	0,00	0,00	52,99	50,30176336
0,27	10,00	0,00	2,67	0,00	0,00	0,00	53,16	50,01736375
0,29	10,00	0,00	2,89	0,00	0,00	0,00	52,37	48,49693825
0,31	10,00	0,00	3,13	0,00	0,00	0,00	44,45	46,87025894
0,32	10,00	0,00	3,18	0,00	0,00	0,00	45,54	46,55474997
0,32	10,00	0,00	3,22	0,00	0,00	0,00	45,68	46,27536601
0,34	10,00	0,00	3,45	0,00	0,00	0,00	44,86	44,75964776
0,35	10,00	0,00	3,48	0,00	0,00	0,00	48,10	44,56201828
0,37	10,00	0,00	3,74	0,00	0,00	0,00	37,97	42,82966645
0,38	10,00	0,00	3,78	0,00	0,00	0,00	38,09	42,5538508
0,40	10,00	0,00	4,00	0,00	0,00	0,00	37,26	41,04152026
0,40	10,00	0,00	4,03	0,00	0,00	0,00	40,48	40,84704883
0,45	10,00	0,00	4,51	0,00	0,00	0,00	41,87	37,62960652
0,53	10,00	0,00	5,27	0,00	0,00	0,00	41,76	32,48171616
0,55	10,00	0,00	5,54	0,00	0,00	0,00	35,66	30,6770223
0,58	10,00	0,00	5,82	0,00	0,00	0,00	38,04	28,79308855
0,62	10,00	0,00	6,18	0,00	0,00	0,00	34,51	26,40192625
0,64	10,00	0,00	6,42	0,00	0,00	0,00	29,46	24,75680339
0,70	10,00	0,00	7,04	0,00	0,00	0,00	31,86	20,57732663
0,71	10,00	0,00	7,12	0,00	0,00	0,00	28,34	20,07683731
0,73	10,00	0,00	7,29	0,00	0,00	0,00	23,29	18,9296416
0,77	10,00	0,00	7,67	0,00	0,00	0,00	25,70	16,33408901
0,79	10,00	0,00	7,91	0,00	0,00	0,00	23,23	14,72367182
0,83	10,00	0,00	8,31	0,00	0,00	0,00	17,15	12,03092707
0,09	0,00	3,33	0,00	0,30	0,00	0,00	80,00	73,52836709
0,14	0,00	3,33	0,00	0,47	0,00	0,00	65,00	69,91448407
0,15	0,00	3,33	0,00	0,49	0,00	0,00	60,00	69,53990993
0,16	0,00	3,33	0,00	0,52	0,00	0,00	60,00	69,02185347
0,16	0,00	3,33	0,00	0,54	0,00	0,00	60,00	68,57445487
0,18	0,00	3,33	0,00	0,60	0,00	0,00	56,67	67,33623812
0,20	0,00	3,33	0,00	0,66	0,00	0,00	55,00	65,92846003
0,25	0,00	3,33	0,00	0,84	0,00	0,00	57,85	62,02612329

0,26	0,00	3,33	0,00	0,88	0,00	0,00	56,01	61,31575013
0,27	0,00	3,33	0,00	0,91	0,00	0,00	56,19	60,73644382
0,29	0,00	3,33	0,00	0,98	0,00	0,00	57,06	59,11252521
0,30	0,00	3,33	0,00	1,00	0,00	0,00	58,06	58,72556343
0,31	0,00	3,33	0,00	1,03	0,00	0,00	55,40	58,00269145
0,32	0,00	3,33	0,00	1,07	0,00	0,00	55,03	57,25949956
0,33	0,00	3,33	0,00	1,09	0,00	0,00	55,47	56,81234718
0,34	0,00	3,33	0,00	1,12	0,00	0,00	56,15	56,21592716
0,34	0,00	3,33	0,00	1,14	0,00	0,00	53,22	55,73051344
0,36	0,00	3,33	0,00	1,21	0,00	0,00	52,63	54,18598151
0,37	0,00	3,33	0,00	1,23	0,00	0,00	52,89	53,86743648
0,38	0,00	3,33	0,00	1,26	0,00	0,00	53,40	53,20440722
0,39	0,00	3,33	0,00	1,29	0,00	0,00	50,33	52,51418401
0,39	0,00	3,33	0,00	1,30	0,00	0,00	49,61	52,23449176
0,40	0,00	3,33	0,00	1,33	0,00	0,00	49,75	51,67024615
0,41	0,00	3,33	0,00	1,35	0,00	0,00	50,16	51,21451526
0,43	0,00	3,33	0,00	1,42	0,00	0,00	47,00	49,69748009
0,43	0,00	3,33	0,00	1,44	0,00	0,00	46,20	49,40450064
0,44	0,00	3,33	0,00	1,47	0,00	0,00	46,27	48,7653204
0,45	0,00	3,33	0,00	1,50	0,00	0,00	46,61	48,09741198
0,45	0,00	3,33	0,00	1,51	0,00	0,00	43,38	47,89731339
0,46	0,00	3,33	0,00	1,53	0,00	0,00	42,51	47,34952316
0,47	0,00	3,33	0,00	1,55	0,00	0,00	42,53	46,90940309
0,49	0,00	3,33	0,00	1,63	0,00	0,00	42,81	45,40720248
0,49	0,00	3,33	0,00	1,64	0,00	0,00	39,54	45,12834211
0,50	0,00	3,33	0,00	1,67	0,00	0,00	38,63	44,50261974
0,51	0,00	3,33	0,00	1,70	0,00	0,00	38,59	43,84755665
0,51	0,00	3,33	0,00	1,71	0,00	0,00	38,84	43,69606203
0,52	0,00	3,33	0,00	1,73	0,00	0,00	35,52	43,15853589
0,55	0,00	3,33	0,00	1,83	0,00	0,00	34,72	40,96585192
0,56	0,00	3,33	0,00	1,86	0,00	0,00	31,37	40,34893751
0,58	0,00	3,33	0,00	1,92	0,00	0,00	30,49	39,05393049
0,62	0,00	3,33	0,00	2,05	0,00	0,00	26,15	36,27058986
0,05	0,00	6,67	0,00	0,33	0,00	0,00	64,04	61,63554191
0,05	0,00	6,67	0,00	0,35	0,00	0,00	61,75	61,41970804
0,05	0,00	6,67	0,00	0,36	0,00	0,00	60,00	61,37816121
0,11	0,00	6,67	0,00	0,74	0,00	0,00	50,00	58,02728185
0,12	0,00	6,67	0,00	0,82	0,00	0,00	50,00	57,27374308
0,17	0,00	6,67	0,00	1,13	0,00	0,00	46,67	54,58176635
0,24	0,00	6,67	0,00	1,62	0,00	0,00	43,40	50,24736705
0,25	0,00	6,67	0,00	1,67	0,00	0,00	42,12	49,77122508
0,27	0,00	6,67	0,00	1,83	0,00	0,00	46,71	48,39411252
0,30	0,00	6,67	0,00	1,99	0,00	0,00	48,04	47,01126082

0,30	0,00	6,67	0,00	2,02	0,00	0,00	49,27	46,72628838
0,35	0,00	6,67	0,00	2,35	0,00	0,00	45,06	43,84762855
0,36	0,00	6,67	0,00	2,37	0,00	0,00	42,13	43,6414976
0,38	0,00	6,67	0,00	2,51	0,00	0,00	45,56	42,44265052
0,40	0,00	6,67	0,00	2,64	0,00	0,00	45,29	41,29405665
0,40	0,00	6,67	0,00	2,68	0,00	0,00	47,23	40,90624512
0,45	0,00	6,67	0,00	2,98	0,00	0,00	41,23	38,29874837
0,45	0,00	6,67	0,00	2,99	0,00	0,00	37,88	38,15016856
0,47	0,00	6,67	0,00	3,12	0,00	0,00	40,94	37,00135742
0,49	0,00	6,67	0,00	3,24	0,00	0,00	40,05	35,93596656
0,54	0,00	6,67	0,00	3,58	0,00	0,00	35,50	33,01459579
0,54	0,00	6,67	0,00	3,59	0,00	0,00	31,93	32,89426186
0,56	0,00	6,67	0,00	3,72	0,00	0,00	34,79	31,77131344
0,57	0,00	6,67	0,00	3,83	0,00	0,00	33,56	30,75170499
0,58	0,00	6,67	0,00	3,88	0,00	0,00	35,95	30,30274408
0,62	0,00	6,67	0,00	4,16	0,00	0,00	28,70	27,87405161
0,63	0,00	6,67	0,00	4,17	0,00	0,00	25,00	27,77116656
0,64	0,00	6,67	0,00	4,30	0,00	0,00	27,73	26,66456955
0,66	0,00	6,67	0,00	4,41	0,00	0,00	26,28	25,6747921
0,67	0,00	6,67	0,00	4,46	0,00	0,00	28,78	25,21136292
0,71	0,00	6,67	0,00	4,73	0,00	0,00	23,15	22,87046035
0,71	0,00	6,67	0,00	4,73	0,00	0,00	21,22	22,8267122
0,73	0,00	6,67	0,00	4,87	0,00	0,00	20,07	21,64079078
0,75	0,00	6,67	0,00	4,98	0,00	0,00	18,44	20,67232729
0,75	0,00	6,67	0,00	5,03	0,00	0,00	21,03	20,19849974
0,79	0,00	6,67	0,00	5,26	0,00	0,00	19,02	18,16549531
0,80	0,00	6,67	0,00	5,32	0,00	0,00	19,57	17,64082192
0,80	0,00	6,67	0,00	5,33	0,00	0,00	19,34	17,54501782
0,84	0,00	6,67	0,00	5,60	0,00	0,00	14,30	15,14856284
0,14	0,00	10,00	0,00	1,44	0,00	0,00	63,33	42,31844026
0,15	0,00	10,00	0,00	1,50	0,00	0,00	55,00	42,05865121
0,16	0,00	10,00	0,00	1,61	0,00	0,00	50,00	41,55140427
0,18	0,00	10,00	0,00	1,84	0,00	0,00	45,00	40,49193583
0,20	0,00	10,00	0,00	2,04	0,00	0,00	40,00	39,51396495
0,21	0,00	10,00	0,00	2,06	0,00	0,00	46,44	39,45470622
0,21	0,00	10,00	0,00	2,09	0,00	0,00	43,14	39,28105678
0,22	0,00	10,00	0,00	2,22	0,00	0,00	39,26	38,67429536
0,23	0,00	10,00	0,00	2,34	0,00	0,00	43,58	38,13921314
0,24	0,00	10,00	0,00	2,38	0,00	0,00	41,57	37,94065714
0,25	0,00	10,00	0,00	2,53	0,00	0,00	38,24	37,26599486
0,26	0,00	10,00	0,00	2,55	0,00	0,00	34,32	37,15154669
0,26	0,00	10,00	0,00	2,60	0,00	0,00	36,32	36,94137183
0,27	0,00	10,00	0,00	2,67	0,00	0,00	34,15	36,58653873

0,28	0,00	10,00	0,00	2,78	0,00	0,00	34,01	36,0832772
0,30	0,00	10,00	0,00	2,99	0,00	0,00	37,82	35,09242386
0,32	0,00	10,00	0,00	3,20	0,00	0,00	34,17	34,13365572
0,33	0,00	10,00	0,00	3,28	0,00	0,00	39,13	33,73183413
0,34	0,00	10,00	0,00	3,41	0,00	0,00	36,30	33,17076208
0,38	0,00	10,00	0,00	3,79	0,00	0,00	37,05	31,39367543
0,38	0,00	10,00	0,00	3,84	0,00	0,00	34,41	31,1509839
0,39	0,00	10,00	0,00	3,87	0,00	0,00	30,42	30,97951241
0,39	0,00	10,00	0,00	3,92	0,00	0,00	33,08	30,74947183
0,39	0,00	10,00	0,00	3,93	0,00	0,00	30,41	30,74603408
0,41	0,00	10,00	0,00	4,13	0,00	0,00	34,05	29,77881989
0,42	0,00	10,00	0,00	4,18	0,00	0,00	31,44	29,54527135
0,43	0,00	10,00	0,00	4,29	0,00	0,00	28,54	29,02486111
0,44	0,00	10,00	0,00	4,41	0,00	0,00	33,64	28,50341333
0,45	0,00	10,00	0,00	4,52	0,00	0,00	32,74	27,95540277
0,46	0,00	10,00	0,00	4,60	0,00	0,00	31,11	27,58948036
0,47	0,00	10,00	0,00	4,74	0,00	0,00	27,00	26,93799388
0,48	0,00	10,00	0,00	4,81	0,00	0,00	28,42	26,61738775
0,50	0,00	10,00	0,00	4,98	0,00	0,00	22,18	25,8451955
0,50	0,00	10,00	0,00	5,04	0,00	0,00	25,00	25,54027158
0,51	0,00	10,00	0,00	5,12	0,00	0,00	25,87	25,16750291
0,53	0,00	10,00	0,00	5,28	0,00	0,00	25,35	24,42778951
0,54	0,00	10,00	0,00	5,39	0,00	0,00	23,93	23,93103044
0,54	0,00	10,00	0,00	5,41	0,00	0,00	24,34	23,81586535
0,55	0,00	10,00	0,00	5,48	0,00	0,00	24,44	23,4976891
0,56	0,00	10,00	0,00	5,60	0,00	0,00	23,55	22,94945216
0,56	0,00	10,00	0,00	5,64	0,00	0,00	24,10	22,73794619
0,57	0,00	10,00	0,00	5,68	0,00	0,00	21,92	22,58352975
0,59	0,00	10,00	0,00	5,88	0,00	0,00	19,22	21,61143714
0,06	3,33	6,67	0,20	0,40	22,21	1,34	70,00	62,86533659
0,12	3,33	6,67	0,40	0,79	22,21	2,64	60,00	58,77908999
0,12	3,33	6,67	0,41	0,83	22,21	2,75	60,00	58,41449185
0,13	3,33	6,67	0,44	0,88	22,21	2,94	56,67	57,84219549
0,15	3,33	6,67	0,49	0,98	22,21	3,25	55,00	56,85469645
0,15	3,33	6,67	0,50	1,01	22,21	3,36	50,00	56,49464284
0,16	3,33	6,67	0,52	1,04	22,21	3,46	50,00	56,18621271
0,17	3,33	6,67	0,57	1,15	22,21	3,81	50,00	55,07207314
0,19	3,33	6,67	0,64	1,28	22,21	4,26	50,00	53,67595938
0,23	3,33	6,67	0,78	1,57	22,21	5,22	47,97	50,64341422
0,24	3,33	6,67	0,80	1,61	22,21	5,37	48,43	50,17390888
0,27	3,33	6,67	0,90	1,81	22,21	6,01	46,96	48,12963485
0,28	3,33	6,67	0,94	1,88	22,21	6,25	44,67	47,37574624
0,29	3,33	6,67	0,97	1,94	22,21	6,47	46,18	46,70109014

0,30	3,33	6,67	1,01	2,03	22,21	6,75	40,49	45,80390583
0,31	3,33	6,67	1,05	2,09	22,21	6,97	39,02	45,10403166
0,32	3,33	6,67	1,06	2,13	22,21	7,09	39,44	44,73986706
0,35	3,33	6,67	1,16	2,32	22,21	7,71	37,92	42,78202517
0,37	3,33	6,67	1,22	2,44	22,21	8,12	37,07	41,48886467
0,38	3,33	6,67	1,26	2,52	22,21	8,39	36,35	40,64625953
0,39	3,33	6,67	1,28	2,57	22,21	8,55	34,75	40,11411559
0,42	3,33	6,67	1,39	2,78	22,21	9,27	30,60	37,85283777
0,44	3,33	6,67	1,45	2,90	22,21	9,67	28,75	36,6112169
0,45	3,33	6,67	1,49	2,98	22,21	9,92	28,07	35,79161955
0,50	3,33	6,67	1,66	3,33	22,21	11,08	29,81	32,15170568
0,51	3,33	6,67	1,70	3,40	22,21	11,33	26,83	31,3550964
0,53	3,33	6,67	1,77	3,54	22,21	11,80	29,45	29,87169275
0,54	3,33	6,67	1,80	3,60	22,21	11,99	30,84	29,28709456
0,55	3,33	6,67	1,82	3,65	22,21	12,15	28,49	28,77898365
0,56	3,33	6,67	1,87	3,74	22,21	12,47	29,89	27,7595091
0,57	3,33	6,67	1,88	3,77	22,21	12,57	26,14	27,45891576
0,58	3,33	6,67	1,92	3,85	22,21	12,81	28,23	26,69601974
0,59	3,33	6,67	1,96	3,93	22,21	13,08	29,21	25,8248843
0,62	3,33	6,67	2,07	4,14	22,21	13,78	26,54	23,63871971
0,63	3,33	6,67	2,10	4,21	22,21	14,03	27,68	22,84124196
0,65	3,33	6,67	2,17	4,35	22,21	14,50	23,72	21,35697669
0,66	3,33	6,67	2,20	4,41	22,21	14,69	25,61	20,77152366
0,67	3,33	6,67	2,23	4,46	22,21	14,85	26,43	20,26256462
0,68	3,33	6,67	2,27	4,56	22,21	15,17	23,62	19,24224858
0,69	3,33	6,67	2,29	4,58	22,21	15,27	24,63	18,94082033
0,70	3,33	6,67	2,33	4,66	22,21	15,51	20,55	18,17709588
0,71	3,33	6,67	2,37	4,74	22,21	15,78	22,35	17,30513842
0,78	3,33	6,67	2,61	5,22	22,21	17,39	16,96	12,24855374
0,10	6,67	3,33	0,64	0,32	22,21	2,15	80,00	65,97623015
0,11	6,67	3,33	0,72	0,36	22,21	2,38	80,00	65,15431339
0,12	6,67	3,33	0,79	0,40	22,21	2,64	80,00	64,26430383
0,14	6,67	3,33	0,91	0,45	22,21	3,03	73,33	62,92928949
0,14	6,67	3,33	0,96	0,48	22,21	3,21	70,00	62,29356838
0,16	6,67	3,33	1,04	0,52	22,21	3,47	60,00	61,40355882
0,17	6,67	3,33	1,13	0,56	22,21	3,77	55,00	60,36422544
0,17	6,67	3,33	1,16	0,58	22,21	3,85	60,00	60,06854449
0,18	6,67	3,33	1,20	0,60	22,21	3,98	60,00	59,61904471
0,19	6,67	3,33	1,23	0,62	22,21	4,11	50,00	59,17853493
0,20	6,67	3,33	1,36	0,68	22,21	4,53	54,06	57,71435607
0,22	6,67	3,33	1,45	0,72	22,21	4,82	62,19	56,72796257
0,22	6,67	3,33	1,49	0,74	22,21	4,95	62,30	56,25559015
0,23	6,67	3,33	1,55	0,77	22,21	5,15	59,40	55,55946394

0,25	6,67	3,33	1,67	0,83	22,21	5,56	63,54	54,13840639
0,26	6,67	3,33	1,76	0,88	22,21	5,85	61,65	53,15190991
0,27	6,67	3,33	1,80	0,90	22,21	5,98	57,48	52,67943531
0,30	6,67	3,33	1,98	0,99	22,21	6,60	57,45	50,56194998
0,32	6,67	3,33	2,12	1,06	22,21	7,05	52,84	48,98226162
0,34	6,67	3,33	2,25	1,12	22,21	7,49	54,45	47,46609116
0,35	6,67	3,33	2,35	1,17	22,21	7,83	51,75	46,27025882
0,36	6,67	3,33	2,43	1,21	22,21	8,10	46,90	45,36352098
0,37	6,67	3,33	2,50	1,25	22,21	8,32	50,70	44,60390963
0,39	6,67	3,33	2,60	1,30	22,21	8,64	48,06	43,46851215
0,39	6,67	3,33	2,63	1,31	22,21	8,75	45,19	43,08308242
0,40	6,67	3,33	2,70	1,35	22,21	8,98	40,17	42,28740692
0,41	6,67	3,33	2,75	1,37	22,21	9,17	43,83	41,65356503
0,43	6,67	3,33	2,85	1,42	22,21	9,50	41,03	40,49003853
0,44	6,67	3,33	2,93	1,46	22,21	9,76	38,03	39,6107898
0,45	6,67	3,33	2,99	1,49	22,21	9,97	38,15	38,87495447
0,46	6,67	3,33	3,09	1,54	22,21	10,29	38,48	37,76039282
0,47	6,67	3,33	3,12	1,56	22,21	10,40	38,05	37,3934923
0,48	6,67	3,33	3,19	1,59	22,21	10,62	39,25	36,61430766
0,49	6,67	3,33	3,24	1,62	22,21	10,80	40,77	35,9953208
0,51	6,67	3,33	3,42	1,71	22,21	11,38	37,94	33,97830216
0,52	6,67	3,33	3,48	1,74	22,21	11,59	33,42	33,2537298
0,54	6,67	3,33	3,58	1,79	22,21	11,91	30,02	32,14954009
0,54	6,67	3,33	3,61	1,80	22,21	12,01	36,57	31,79226864
0,56	6,67	3,33	3,73	1,86	22,21	12,41	33,83	30,41127778
0,57	6,67	3,33	3,83	1,91	22,21	12,74	33,40	29,26895772
0,58	6,67	3,33	3,90	1,95	22,21	12,99	28,74	28,40923912
0,61	6,67	3,33	4,09	2,04	22,21	13,61	27,03	26,2424644
0,62	6,67	3,33	4,15	2,07	22,21	13,83	28,67	25,47787641
0,63	6,67	3,33	4,21	2,10	22,21	14,01	24,09	24,87256843
0,65	6,67	3,33	4,31	2,15	22,21	14,34	23,57	23,73536398
0,69	6,67	3,33	4,63	2,31	22,21	15,43	18,45	19,96638545
0,11	3,335	3,335	0,36	0,36	11,12	1,22	67,00	68,61473437
0,12	3,335	3,335	0,40	0,40	11,12	1,34	66,50	67,79503997
0,13	3,335	3,335	0,43	0,43	11,12	1,42	66,00	67,22931071
0,15	3,335	3,335	0,49	0,49	11,12	1,63	65,00	65,85602052
0,15	3,335	3,335	0,51	0,51	11,12	1,72	64,00	65,29029126
0,16	3,335	3,335	0,54	0,54	11,12	1,79	60,00	64,81974199
0,17	3,335	3,335	0,56	0,56	11,12	1,88	55,67	64,22755945
0,19	3,335	3,335	0,64	0,64	11,12	2,13	54,00	62,51481189
0,21	3,335	3,335	0,69	0,69	11,12	2,29	57,00	61,4688456
0,22	3,335	3,335	0,72	0,72	11,12	2,41	61,30	60,67942312
0,22	3,335	3,335	0,74	0,74	11,12	2,48	57,51	60,24488443

0,23	3,335	3,335	0,77	0,77	11,12	2,58	53,19	59,55621223
0,24	3,335	3,335	0,82	0,82	11,12	2,72	48,54	58,61640813
0,25	3,335	3,335	0,84	0,84	11,12	2,79	52,04	58,15868024
0,27	3,335	3,335	0,90	0,90	11,12	2,99	50,57	56,83092611
0,28	3,335	3,335	0,94	0,94	11,12	3,13	42,46	55,87265975
0,30	3,335	3,335	1,00	1,00	11,12	3,33	41,31	54,57015113
0,31	3,335	3,335	1,05	1,05	11,12	3,49	40,20	53,47905593
0,36	3,335	3,335	1,19	1,19	11,12	3,95	39,52	50,41999729
0,40	3,335	3,335	1,33	1,33	11,12	4,45	36,65	47,12195688
0,45	3,335	3,335	1,51	1,51	11,12	5,04	31,40	43,2074012
0,48	3,335	3,335	1,59	1,59	11,12	5,30	31,95	41,49137226
0,49	3,335	3,335	1,64	1,64	11,12	5,48	32,67	40,27303248
0,52	3,335	3,335	1,75	1,75	11,12	5,84	36,41	37,91111443
0,53	3,335	3,335	1,78	1,78	11,12	5,92	36,31	37,31815157
0,55	3,335	3,335	1,83	1,83	11,12	6,12	35,48	36,0292202
0,56	3,335	3,335	1,86	1,86	11,12	6,21	32,72	35,41459236
0,57	3,335	3,335	1,89	1,89	11,12	6,29	32,95	34,89759204
0,59	3,335	3,335	1,96	1,96	11,12	6,55	28,42	33,17483014
0,60	3,335	3,335	1,99	1,99	11,12	6,64	28,64	32,58116961
0,62	3,335	3,335	2,08	2,08	11,12	6,92	28,40	30,67623155
0,63	3,335	3,335	2,10	2,10	11,12	7,00	28,26	30,15854993
0,64	3,335	3,335	2,13	2,13	11,12	7,11	27,40	29,42621573
0,65	3,335	3,335	2,18	2,18	11,12	7,26	24,60	28,43444225
0,66	3,335	3,335	2,20	2,20	11,12	7,35	24,80	27,84011626
0,69	3,335	3,335	2,31	2,31	11,12	7,72	20,40	25,41553094
0,70	3,335	3,335	2,35	2,35	11,12	7,83	20,07	24,68255279
0,72	3,335	3,335	2,39	2,39	11,12	7,98	20,12	23,69013905
0,73	3,335	3,335	2,42	2,42	11,12	8,06	19,95	23,09517766
0,74	3,335	3,335	2,48	2,48	11,12	8,26	19,07	21,80426324
0,76	3,335	3,335	2,53	2,53	11,12	8,43	16,43	20,66871473

Примітка:

Y – результуючий показник;

$Y_{\text{прогнозоване}}$ – прогнозований результуючий показник;

$x1$ – середня щільність потоку, $\text{м}^2/\text{м}^2$;

$x2$ – відсоток осіб групи мобільності М3 в потоці, %;

$x3$ – відсоток осіб групи мобільності М4 в потоці, %.