Розробка програмного комплексу для розрахунку часу евакуації людей при надзвичайних ситуаціях

Development of a Software Complex for Calculating Human Evacuation Time in Emergency Situations

Дмитро Радчук
Corresponding author: кандидат технічних наук, доцент кафедри охорони праці та цивільної безпеки, e-mail: radchuk.d.i@nmu.one, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-8034-541X

Богдан Кравченко
асистент кафедри охорони праці та цивільної безпеки, e-mail: Kravchenko.Bo.D@nmu.one, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-8398-0793

Єгор Жир
аспірант кафедри охорони праці та цивільної безпеки, e-mail: yehor.zhyr.work@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0009-0001-3701-1710

Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна

Dmytro Radchuk
Corresponding author: Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Labor Safety and Civil Security, e-mail: radchuk.d.i@nmu.one, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-8034-541X

Bohdan Kravchenko
Assistant of the Department of Occupational Health and Civil Safety, e-mail: Kravchenko.Bo.D@nmu.one, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-8398-0793

Yehor Zhyr
PhD Student of the Department of Labor Safety and Civil Security, e-mail: yehor.zhyr.work@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0009-0001-3701-1710

Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

Received: September 25, 2026 | Revised: October 20, 2026 | Accepted: October 31, 2026

УДК 614.847:004.94

DOI: https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.5.44

Мета дослідження. Розробка програмного комплексу для оперативного визначення часу евакуації людей за надзвичайних ситуацій з урахуванням конструктивно-планувальних характеристик будівель, наявних технічних перешкод на евакуаційних шляхах та соціально-демографічного складу евакуйованих осіб.

Методи дослідження. Використано методи аналізу та узагальнення наукових джерел і нормативних документів, математичного моделювання процесів евакуації, системного аналізу параметрів людських потоків та комп'ютерного моделювання. Розрахунковий алгоритм реалізовано мовою Python з урахуванням геометричних характеристик шляхів евакуації, пропускної здатності виходів, передевакуаційного періоду та соціально-демографічного складу осіб, що підлягають евакуації.

Результати дослідження. Удосконалено розрахунковий підхід до оперативного визначення часу евакуації людей під час надзвичайних ситуацій, який реалізовано у вигляді програмного комплексу, який враховує характеристики евакуаційних шляхів, пропускну здатність виходів, передевакуаційний період та соціально-демографічний склад евакуаційної групи. Реалізований алгоритм забезпечує інженерне оцінювання часу евакуації без застосування складних агентних моделей. За результатами моделювання встановлено, що збільшення чисельності людей і погіршення стану шляхів евакуації призводять до зростання часу евакуації. Показано суттєвий вплив коефіцієнта захаращеності та складу людського потоку на результати розрахунку, зокрема за наявності дітей у складі евакуаційної групи.

Теоретична цінність дослідження. Запропоновано розрахунковий підхід до визначення часу евакуації, у якому враховуються час реакції людей на сигнал про небезпеку, умови проходження шляхів евакуації та склад евакуаційної групи. Вплив складу групи враховується за допомогою коефіцієнта мобільності, а стан шляхів евакуації – за допомогою коефіцієнта захаращеності.

Практична цінність дослідження. Розроблений програмний комплекс може бути використаний для попереднього оцінювання умов евакуації на об'єктах різного призначення,

Purpose. The development of a software complex for the rapid determination of human evacuation time in emergency situations, taking into account the structural and planning characteristics of buildings, existing technical obstacles along evacuation routes, and the socio-demographic composition of evacuees.

Method. The study employs methods of analysis and synthesis of scientific sources and regulatory documents, mathematical modelling of evacuation processes, system analysis of human flow parameters, and computer modelling. The computational algorithm is implemented in Python, taking into account the geometric characteristics of evacuation routes, exit throughput capacity, the pre-evacuation period, and the socio-demographic composition of persons subject to evacuation.

Findings. The computational approach to the rapid determination of human evacuation time during emergency situations has been improved and implemented as a software complex that takes into account the characteristics of evacuation routes, exit throughput capacity, the pre-evacuation period, and the socio-demographic composition of the evacuation group. The implemented algorithm provides an engineering-based assessment of evacuation time without the use of complex agent-based models. The modelling results show that an increase in the number of people and deterioration of evacuation route conditions lead to an increase in evacuation time. A significant influence of the clutter coefficient and the composition of the human flow on the calculation results was demonstrated, particularly when children are present in the evacuation group.

Theoretical implications. A computational approach to determining evacuation time is proposed, which takes into account the response time of people to a danger signal, the conditions of movement along evacuation routes, and the composition of the evacuation group. The influence of the group composition is taken into account using a mobility coefficient, while the condition of evacuation routes is accounted for using a clutter coefficient.

Practical implications. The developed software complex can be used for preliminary assessment of evacuation conditions at facilities

порівняння альтернативних сценаріїв евакуації та обґрунтування заходів щодо підвищення безпеки людей під час надзвичайних ситуацій.
Тип дослідження. Оригінальна наукова стаття.

of various purposes, comparison of alternative evacuation scenarios, and justification of measures aimed at improving human safety during emergency situations.
Paper type. Original Research Article.

Ключові слова час евакуації; соціальна група; програмний комплекс; людський потік; надзвичайна ситуація; евакуаційні шляхи.

Key words. Evacuation Time; Social Group; Software Complex; Human Flow; Emergency Situation; Evacuation Routes.

Вступ

В умовах воєнного стану в Україні забезпечення безпечних умов перебування працівників, відвідувачів та населення загалом є одним із пріоритетних завдань держави, органів місцевого самоврядування та роботодавців. Сучасні загрози характеризуються високою динамічністю та непередбачуваністю, що значно ускладнює організацію своєчасного реагування на надзвичайні ситуації. Якщо виникнення окремих надзвичайних ситуацій природного характеру може бути прогнозоване завдяки системам моніторингу та прогнозування, то надзвичайні ситуації техногенного та воєнного характеру часто виникають раптово та потребують невідкладних дій щодо захисту людей. Особливо це стосується ракетних ударів, застосування безпілотних літальних апаратів та інших засобів ураження, коли час для прийняття рішення щодо евакуації та здійснення необхідних дій може бути вкрай обмеженим [1].

За таких умов одним із найефективніших способів зниження ризику загибелі та травмування людей є своєчасна евакуація до захисних споруд, укриттів або інших безпечних місць. Ефективність евакуації визначається не лише наявністю шляхів руху та систем оповіщення, а й можливістю забезпечити переміщення всіх людей у безпечну зону протягом обмеженого проміжку часу [2,3].

Особливої актуальності питання розрахунку часу евакуації набуває під час надзвичайних ситуацій, пов'язаних із пожежами. У цьому випадку на людей впливають не лише високі температури, а й небезпечні фактори пожежі, зокрема задимлення, зниження видимості, підвищення концентрації токсичних продуктів горіння, насамперед монооксиду вуглецю та інших шкідливих речовин [4]. Наявність таких факторів суттєво зменшує швидкість пересування людей, ускладнює орієнтування в просторі та призводить до збільшення тривалості евакуації [5, 6].

Разом із тим, навіть за відсутності пожежі тривалість евакуації може істотно зростати через особливості планувальних рішень будівлі та організаційні чинники. До технічних причин належать недостатня ширина шляхів евакуації, наявність вузьких коридорів, дверних прорізів, сходових маршів, локальних зон скупчення людей або захаращення шляхів руху [7]. Організаційними факторами є чисельність людей, їхній віковий склад, рівень мобільності, а також наявність осіб з інвалідністю, людей похилого віку та малолітніх дітей. Зазначені фактори можуть суттєво впливати на інтенсивність людських потоків та, відповідно, на загальний час евакуації [8].

На практиці проєктування та організація евакуаційних шляхів здійснюються відповідно до вимог нормативних документів у сфері цивільного захисту та пожежної безпеки. Водночас наявність організованих евакуаційних шляхів та планів евакуації сама по собі не дає змоги оцінити фактичну тривалість переміщення людей з конкретного об’єкта, оскільки час евакуації залежить від сукупності характеристик будівлі та параметрів людського потоку.

У зв'язку з цим існує потреба у створенні сучасних програмних засобів, що дозволяють виконувати оперативний розрахунок часу евакуації людей з урахуванням параметрів людського потоку, архітектурно-планувальних особливостей будівель та можливих обмежень шляхів руху. Розроблення таких засобів є важливим напрямом для підвищення ефективності заходів цивільного захисту та забезпечення безпеки людей під час надзвичайних ситуацій.

Огляд літератури

Проблема забезпечення своєчасної та безпечної евакуації людей є предметом досліджень у галузях цивільного захисту, пожежної безпеки, будівельної інженерії та моделювання людської поведінки. Нормативною основою організації евакуаційних заходів в Україні є, зокрема, Кодекс цивільного захисту України, який передбачає проведення евакуації на державному, регіональному, місцевому та об'єктовому рівнях [9]. Вимоги до забезпечення безпечної евакуації людей у разі пожежі, а також до евакуаційних шляхів, виходів і сходів визначені ДБН В.1.1-7:2016 [10]. Водночас нормативне забезпечення евакуації не усуває необхідності розрахункового оцінювання її тривалості, оскільки фактичний час переміщення людей залежить від характеристик будівлі, параметрів евакуаційних шляхів та характеристик людського потоку.

Одним з основних напрямів розвитку досліджень у сфері евакуації є математичне та комп'ютерне моделювання руху людей. Chen, Shi та Li у систематичному огляді досліджень моделювання евакуації людей у приміщеннях узагальнили основні підходи, моделі та програмні засоби, що застосовуються для аналізу евакуаційних процесів. Автори розглядають різні способи представлення руху людей, особливостей будівлі та поведінкових чинників, а також звертають увагу на питання адаптивності моделей, їх верифікації та валідації [11]. Це свідчить про широкий спектр наявних комп'ютерних засобів і різний рівень деталізації моделювання процесу евакуації. Проте, розглянуті програмні комплекси потребують великої кількості детальної інформації та переважно ґрунтуються на оцінці ризиків, що виникають при русі людей.

Важливим напрямом досліджень є експериментальне визначення параметрів, які можуть безпосередньо використовуватися для опису та розрахункового оцінювання руху людей під час евакуації. Ivanov та Chow провели експериментальне й чисельне дослідження евакуації з висотної офісної будівлі та проаналізували вплив характеристик сходів, кількості людей, часу до початку руху, швидкості та щільності потоку на тривалість евакуації. Результати експериментальних спостережень порівнювалися з результатами чисельного моделювання, що дозволило оцінити відповідність розрахункового підходу фактичним характеристикам руху людей [12].

У межах інженерних підходів до опису руху людей важливе місце посідають моделі взаємозв'язку між щільністю, швидкістю та інтенсивністю потоку. Wang та Shen досліджували фундаментальну діаграму руху пішоходів і запропонували модель, що описує залежність основних характеристик людського потоку від його щільності. Автори показали, що характер такої залежності може відрізнятися залежно від умов руху, зокрема на коридорах, сходах та інших ділянках маршруту [13]. Однак для числового оцінювання часу евакуації підтверджується необхідність окремо враховувати параметри щільності та швидкості людського потоку.

Водночас визначення часу евакуації не можна розглядати виключно як задачу переміщення людського потоку вздовж заданого маршруту. Wang, Kyriakidis та Dang у систематичному огляді досліджень з урахуванням людського фактора показали розвиток евакуаційного моделювання від простих інженерних рівнянь до складніших моделей, здатних відображати поведінку та рішення людей під час евакуації [14]. Автори систематизували основні поведінкові фактори, що можуть впливати на різні етапи евакуаційного процесу, та звернули увагу на обмеження моделей, пов'язані з представленням поведінки людей [14]. Це обґрунтовує необхідність урахування в моделях не лише геометричних характеристик евакуаційного маршруту, а й параметрів, пов'язаних із характеристиками та поведінкою евакуйованих.

Окремий напрям досліджень становлять математичні моделі, безпосередньо орієнтовані на визначення тривалості евакуації. Hui, Yu та Peng запропонували математичну

модель оцінювання часу евакуації для станцій метрополітену, у якій враховано інтенсивність пасажирського потоку, параметри об'єкта, щільність людей, довжину горизонтальних ділянок руху та характеристики сходів [2]. У роботі також визначалися ділянки, які можуть обмежувати пропускну здатність евакуаційного маршруту, а результати математичного розрахунку порівнювалися з результатами моделювання у програмному середовищі Pathfinder [2]. Отримані результати свідчать про можливість використання математичного моделювання для оперативного оцінювання тривалості евакуації, однак параметри такої моделі залежать від специфіки об'єкта та прийнятих умов моделювання.

Окрему увагу в дослідженнях приділяють вертикальному переміщенню людей, оскільки рух сходами може суттєво впливати на загальну тривалість евакуації та формування скупчень. Lu, Zhao, Wu та Zhu експериментально досліджували характеристики підйому і спуску людей сходами під час евакуації в умовах відсутності видимості. Автори аналізували швидкість руху на сходах і площадках, характеристики щільності та швидкості потоку, а також особливості поведінки й переміщення людей на вертикальних ділянках маршруту [15]. Отримані результати підтверджують необхідність окремого врахування характеристик руху сходами під час визначення загального часу евакуації.

Окрему увагу в дослідженнях приділено впливу умов видимості на характеристики евакуаційного руху. Хіе та співавтори експериментально досліджували рух людей і малих груп за різних умов видимості та аналізували швидкість переміщення й вибір маршруту. Результати дослідження показали, що зміна умов видимості впливає на характеристики руху та прийняття рішень щодо маршруту евакуації [16]. Це підтверджує доцільність урахування умов видимості як одного з факторів, що можуть змінювати параметри руху людей під час надзвичайної ситуації.

Подальший розвиток евакуаційного моделювання пов'язаний із використанням агентних підходів, у яких окремі люди розглядаються як самостійні елементи моделі. Islas-Toski та співавтори запропонували агентну модель евакуації, у якій люди, перешкоди та виходи взаємодіють у межах заданого простору, а процес руху доповнюється правилами, що враховують окремі поведінкові стани, зокрема дезорієнтацію та інші реакції в умовах стресу [3]. Такий підхід забезпечує детальніше представлення індивідуальної поведінки та взаємодії людей, однак потребує відповідного набору параметрів і складнішої моделі процесу евакуації.

Порівняння різних типів програмних моделей показує, що вибір способу представлення людського потоку може впливати на результати оцінювання евакуації. Spearpoint та співавтори порівняли мікроскопічний агентний підхід, реалізований у Pathfinder, та макроскопічний потоковий підхід Evacuationz для моделювання евакуації з висотних житлових будівель. У дослідженні аналізувався вплив таких параметрів, як висота будівлі, кількість квартир на поверсі, ширина та кількість сходів, а також характеристики руху людей. Автори показали можливість використання обох підходів для аналізу евакуації та відмінності між ними, пов'язані з рівнем деталізації й способом представлення процесу [17].

Окремою проблемою під час використання математичних і комп'ютерних моделей є перевірка відповідності отриманих результатів реальним процесам евакуації. Cuesta та співавтори використали дані п'яти евакуаційних навчань у шкільних будівлях для порівняння результатів, отриманих за допомогою різних моделей евакуації, з фактичними спостереженнями. У дослідженні аналізувалися, зокрема, час до початку руху, обрані маршрути, швидкість переміщення та час прибуття людей до безпечної зони [18]. Це підкреслює необхідність перевірки розроблених моделей на основі експериментальних або натурних даних.

Проведений аналіз наукових праць свідчить про різноманітність підходів до моделювання процесу евакуації – від інженерно-аналітичних розрахунків параметрів людського потоку до математичних, поведінкових та агентних моделей. Для систематизації розглянутих досліджень, порівняння їх основних характеристик та визначення положень, які

мають значення для формування розрахункового підходу до оцінювання часу евакуації, результати аналізу наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика наукових підходів до моделювання та оцінювання часу евакуації

Автори	Метод/підхід	Що дослід-жується	Основні параметри/ особливості	Обмеження/ос обливості підходу	Положення, що враховуються при розробленні підходу
Chen et al., 2021 [11]	Огляд моделей	Моделі та засоби моделюван-ня евакуації в приміщен-нях	Підходи, моделі, програмні засоби, рух людей, пове-дінка, верифікація та валідація	Різний рівень деталізації й вимоги до вихідних даних	Визначення структури моделі та необхідного набору параметрів
Ivanov & Chow, 2023 [12]	Експери-ментально-чисельний	Евакуація з висотної офісної будівлі	Сходи, кількість людей, час до початку руху, швидкість, щільність, чисельне моделювання	Конкретні характерис-тики досліджува-ної будівлі та сценарію	Урахування параметрів руху та необхідність перевірки розрахунків
Wang & Shen, 2019 [13]	Інженерно-аналітичний	Взаємозв'я-зок щільності, швидкості та потоку	Щільність, швид-кість, інтенсивність потоку, різні умови руху	Залежність характерис-тик потоку від умов руху	Урахування щільності та швидкості як взаємопов'язаних параметрів
Wang et al., 2021 [14]	Поведінковий	Людський фактор	Поведінка, рішення, реакції людей	Складність формалізації поведінки	Урахування характеристик і поведінки людей
Hui et al., 2024 [2]	Математичний	Розрахунок часу евакуації	Потік, щільність, горизонтальні ділянки, сходи, пропускна здатність	Залежність від параметрів об'єкта	Урахування геометрії маршруту та параметрів потоку
Lu et al., 2021 [15]	Експери-ментальний	Рух сходами в умовах відсутності видимості	Швидкість, щільність, сходи, площадки, умови видимості	Конкретні умови експерименту	Урахування особливостей вертикального руху та умов видимості
Xie et al., 2018 [16]	Експери-ментальний	Рух людей за різних умов видимості	Швидкість руху, маршрут, видимість, індивідуальний та груповий рух	Експериментал ьні умови конкретного об'єкта	Урахування впливу видимості на характеристики руху та вибір маршруту
Islas-Toski et al., 2024 [3]	Агентний	Індивідуаль-на поведінка	Агенти, взаємодія, маршрути	Значна кількість параметрів	Можливість урахування індивідуальних характеристик
Spearpoint et al., 2024 [17]	Порівняльний	Макро- та мікромоделі	Геометрія, сходи, потік	Різний рівень деталізації	Вибір рівня складності моделі
Cuesta et al., 2017 [18]	Валідаційний	Перевірка моделей	Реальні евакуації, швидкість, маршрути, час	Необхідність натурних даних	Необхідність валідації розрахункового підходу

Джерело: розроблено авторами за результатами моделювання.

Отже, проведені дослідження охоплюють широкий спектр чинників, які визначають тривалість евакуації: геометричні характеристики об'єкта, швидкість і щільність людського потоку, пропускну здатність евакуаційних шляхів, характеристики сходів, час до початку руху, умови

видимості та поведінкові особливості людей. При цьому підходи суттєво відрізняються за рівнем деталізації, способом представлення людського потоку та вимогами до вихідних даних. Значна частина досліджень поєднує математичні або комп'ютерні моделі з експериментальними даними, що підкреслює важливість перевірки адекватності розрахункових результатів. Це свідчить про доцільність подальшого пошуку балансу між складністю моделі, кількістю необхідних вихідних даних та можливістю її оперативного практичного застосування.

Метою роботи є розробка програмного комплексу для оперативного визначення часу евакуації людей у разі надзвичайних ситуацій з урахуванням конструктивно-планувальних характеристик будівель, наявних технічних перешкод на евакуаційних шляхах та соціально-демографічного складу евакуйованих осіб.

Методологія дослідження

Розрахунок часу евакуації здійснюється відповідно до чинних нормативних документів у сфері пожежної безпеки з урахуванням залежностей, що враховують довжину шляхів евакуації, швидкість руху людських потоків та пропускну спроможність евакуаційного виходу. У розробленому програмному комплексі розрахунок здійснюється послідовно для окремих ділянок евакуаційного маршруту: коридору, сходів, сходових площадок та виходу. Така послідовність відповідає алгоритму, реалізованому у програмному коді, та дає змогу визначати загальний розрахунковий час евакуації на основі результатів розрахунку окремих етапів переміщення.

В основу методики покладено концепцію впорядкованої евакуації людей з будівель у разі виникнення надзвичайної ситуації. На відміну від моделей, орієнтованих на дослідження натовпу та панічної поведінки людей, запропонований підхід передбачає організований рух евакуйованих визначеними шляхами під керівництвом відповідальних осіб.

Методика враховує три основні складові процесу евакуації: передевакуаційний період, рух шляхами евакуації та проходження евакуаційного виходу.

Базові розрахункові залежності ґрунтуються на положеннях класичної теорії руху людських потоків та чинних методик розрахунку евакуації. Передевакуаційний період характеризується часом реакції людей на сигнал тривоги. Для врахування особливостей різних категорій населення у моделі використовуються окремі часові інтервали реагування для дорослих осіб, дітей, людей похилого віку та осіб з інвалідністю.

Параметри руху визначаються з урахуванням складу людського потоку та стану шляхів евакуації. Для цього використовується коефіцієнт мобільності, який враховує відмінності у розрахунковій мобільності окремих категорій евакуйованих осіб. Додатково враховується коефіцієнт захаращеності шляхів евакуації, який характеризує наявність перешкод та погіршення умов руху.

Час руху визначається окремо для горизонтальних ділянок, сходових маршів та сходових площадок. При цьому передбачається, що рух людей здійснюється без зустрічних потоків та без утворення критичних скупчень людей.

Тривалість проходження евакуаційного виходу визначається його пропускною здатністю, яка залежить від геометричних характеристик шляху евакуації та складу людського потоку.

Час безпосереднього руху евакуйованих визначається як сума часу проходження окремих ділянок евакуаційного маршруту:

$$T_{mov} = T_{corr} + T_{stairs} + T_{plat} + T_{exit}, \quad (1)$$

де T_{corr} – час руху коридором, с;
T_{stairs} – час руху сходами, с;
T_{plat} – час проходження сходових площадок, с;
T_{exit} – час проходження через евакуаційний вихід, с.

Повний розрахунковий час евакуації визначається з урахуванням передевакуаційного періоду:

$$T_{total} = T_{react} + T_{mov}, \quad (2)$$

де T_{react} – час реакції людей на сигнал про небезпеку, с;

T_{mov} – час безпосереднього руху людини або групи людей по будівлі до виходу з урахуванням перешкод, с.

Наукова новизна запропонованого підходу полягає у формуванні розрахункового алгоритму визначення часу евакуації, в якому в межах одного розрахунку враховуються час реакції людей на сигнал про небезпеку, умови проходження шляхів евакуації та склад евакуаційної групи. Вплив складу групи враховується за допомогою коефіцієнта мобільності, який використовується під час визначення швидкості руху коридором, сходами та пропускної здатності сходової ділянки. Стан шляхів евакуації враховується коефіцієнтом захаращеності. У результаті повний час евакуації визначається з урахуванням як часу реакції людей, так і часу їх переміщення до виходу.

Для визначення передевакуаційного періоду в моделі використовуються інтервали часу реакції, задані для окремих категорій евакуйованих осіб. Для дорослих осіб приймається інтервал від 30 до 60 с, для дітей від 90 до 120 с, для людей похилого віку від 90 до 120 с, для осіб з інвалідністю від 120 до 150 с. Оскільки завершення евакуації визначається виходом останньої особи, для формування повного часу евакуації використовується максимальний час реакції серед категорій населення, наявних у групі. У результаті визначаються мінімальна та максимальна оцінки повного часу евакуації.

Після визначення загальної структури розрахунку послідовно визначаються параметри, необхідні для розрахунку часу руху. Оскільки швидкість руху та пропускна здатність залежать від складу евакуйованої групи, спочатку визначається частка осіб, які не належать до трьох виділених у програмі груп:

$$P_n = 100 - P_d - P_e - P_i, \quad (3)$$

де P_d – частка дітей, %;

P_e – частка людей похилого віку, %;

P_i – частка осіб з інвалідністю, %;

P_n – частка решти евакуйованих осіб, %.

Наведена залежність забезпечує визначення частки евакуйованих осіб, яка не належить до трьох виділених у програмі груп. Отримане значення P_n використовується на наступному етапі для розрахунку узагальненого коефіцієнта мобільності групи.

Коефіцієнт мобільності визначається як зважене середнє значення введених часток населення:

$$K_{mob} = \frac{(P_n \cdot 1{,}0 + P_d \cdot 0{,}8 + P_e \cdot 0{,}7 + P_i \cdot 0{,}4)}{100}, \quad (4)$$

де K_{mob} – коефіцієнт мобільності.

Інтегральний коефіцієнт мобільності K_{mob} у запропонованій моделі характеризує узагальнений вплив складу евакуаційної групи на розрахункові параметри її руху. Його визначення як середньозваженої величини дає змогу врахувати частку окремих категорій евакуйованих та представити відмінності в їхній мобільності одним розрахунковим показником. При цьому K_{mob}не розглядається як безпосередня характеристика швидкості кожної окремої особи, а використовується як коефіцієнт коригування базових параметрів руху групи. У подальшому K_{mob} використовується для коригування базової швидкості руху та пропускної здатності евакуаційного маршруту при визначенні швидкості руху коридором, швидкості руху сходами та пропускної здатності.

Такий спосіб розрахунку є спрощеним представленням впливу складу групи. Він не враховує можливу непропорційну дію окремої маломобільної особи на швидкість організованого потоку, тому отриманий K_{mob} не слід трактувати як безпосередню характеристику фактичної швидкості всієї групи.

Значення 1,0; 0,8; 0,7 та 0,4 у цій роботі прийняті авторами як розрахункові коефіцієнти для врахування відмінностей у мобільності окремих категорій евакуйованих. Значення 1,0 прийнято як базове для дорослих осіб, а менші значення – для дітей, людей похилого віку та осіб з інвалідністю відповідно. Коефіцієнти не є нормативними показниками і використовуються для спрощеного врахування відмінностей у мобільності різних категорій людей під час розрахунку параметрів руху [19].

Після визначення коефіцієнта мобільності розраховується ефективна швидкість руху коридором. Необхідність такого розрахунку пов'язана з тим, що у програмі базова швидкість коригується залежно від коефіцієнта захаращеності та складу евакуйованої групи. Ефективна швидкість руху коридором визначається:

$$V_{corr} = V_0 \cdot K_z \cdot K_{mob}, \quad (5)$$

де V_0 – базова швидкість руху горизонтальною ділянкою, прийнята рівною 0,9 м/с;

K_z – коефіцієнт захаращеності, який враховує вплив перешкод на швидкість руху та пропускну здатність шляхів евакуації.

Значення базової швидкості 0,9 м/с прийнято відповідно до значення, використаного в розрахунковому методі оцінювання часу евакуації для руху людей шляхами евакуації [20].

Отже, у програмі базове значення швидкості коригується двома параметрами, що характеризують умови руху та склад евакуйованої групи. Коефіцієнт захаращеності Kz введено в модель для врахування впливу перешкод на шляхах евакуації. У розрахунках його значення змінюється від 1,0 для вільної ділянки до 0,6 для ділянки зі значним рівнем захаращеності. Зазначений діапазон є розрахунковим припущенням авторів і використовується для моделювання різного стану шляхів евакуації.

Оскільки рух сходами розглядається програмою як окрема ділянка евакуаційного маршруту, для нього встановлено окреме базове значення швидкості. Розрахунок виконується за аналогічним принципом, що й для горизонтальної ділянки. Швидкість руху сходами визначається:

$$V_{stairs} = V_s \cdot K_z \cdot K_{mob}, \quad (6)$$

Vs = 0,4 – базова швидкість руху сходами, м/с.

Швидкість руху сходами розглядається окремо від швидкості руху горизонтальними ділянками, оскільки на неї впливають умови руху, геометричні характеристики сходів та щільність потоку людей [15]. У цій роботі базову швидкість руху сходами V_s прийнято рівною 0,4 м/с як розрахункове значення моделі, що враховує зниження швидкості під час переміщення сходами порівняно з горизонтальною ділянкою.

Програмою передбачено окремий розрахунок швидкості для горизонтального та вертикального переміщення. Отримані значення K_{mob} і V_{stairs} використовуються відповідно для визначення часу руху коридором та сходами.

Після визначення ефективної швидкості для горизонтальної ділянки розраховується час її проходження. Оскільки довжина коридору є вихідним параметром програми, час руху визначається відношенням пройденої відстані до швидкості руху:

$$T_{corr} = \frac{L_{corr}}{V_{corr}}, \quad (7)$$

де L_{corr} – довжина коридору, м;

V_{corr} – ефективна швидкість руху коридором, м/с.

Отриманий результат T_{corr} формує першу складову загального часу евакуації та передається до підсумкового розрахунку.

Для визначення часу руху сходами спочатку встановлюється кількість поверхів, які необхідно подолати. У програмі це значення визначається залежністю:

$$N_{desc} = max(N_f - 1; 0), \quad (8)$$

де N_f – номер поверху перебування людей (вихід на першому поверсі).

Функція max забезпечує невід'ємне значення кількості поверхів спуску. Якщо спуск сходами не потрібний, відповідні розрахункові параметри приймають рівними нулю.

Вертикальну висоту спуску визначають за формулою:

$$H = N_{desc} \times H_f \quad (9)$$

де H_f – висота одного поверху, м.

Отриману висоту H використовують для визначення довжини шляху сходами. Для переходу від вертикальної висоти до довжини шляху в моделі прийнято кут нахилу сходового маршу 40°. Тоді:

$$L_{stairs} = \frac{H}{sin(40°)} \quad (10)$$

де H – вертикальна висота спуску, м.

Отриману довжину L_{stairs} використовують для визначення тривалості руху сходами з урахуванням попередньо розрахованої швидкості V_{stairs}.

Час руху сходами обчислюють за формулою:

$$T_{stairs} = \frac{L_{stairs}}{V_{stairs}} \quad (11)$$

де V_{stairs} – розрахункова швидкість руху сходами, м/с.

Отже, тривалість переміщення сходами визначають послідовно через кількість поверхів спуску, вертикальну висоту, довжину сходового шляху та швидкість руху.

Окрім руху сходовими маршами, у програмі окремо враховують час проходження сходових майданчиків. Їхню кількість у прийнятій геометричній схемі визначають за формулою:

$$N_{plat} = 2 \times N_{desc} \quad (12)$$

Рух сходовими майданчиками відрізняється від руху сходовими маршами, оскільки залежить від геометрії майданчика, умов переміщення та щільності людського потоку [15]. У цій роботі час проходження одного майданчика прийнято рівним 10 с як модельне припущення. Це значення спрощує розрахунок тривалості переміщення між сходовими маршами й не є нормативно встановленою величиною.

Загальний час проходження сходових майданчиків визначають за формулою:

$$T_{plat} = N_{plat} \times t_{plat} \quad (13)$$

де t_{plat} – прийнятий у моделі час проходження одного сходового майданчика, 10 с.

Час проходження майданчиків є окремою складовою загального часу евакуації та додається до часу руху сходовими маршами.

Після визначення часу переміщення коридором і сходами в програмі розраховують пропускну здатність сходової ділянки:

$$Q = 1{,}8 \times B \times K_z \times K_{mob} \quad (14)$$

де B – ширина сходів, м;
K_z – коефіцієнт захаращеності;
K_{mob} – коефіцієнт мобільності.

У програмі для обчислення Q використовують ширину сходів, задану користувачем. Розрахована величина Q характеризує пропускну здатність сходової ділянки. Її одиниця вимірювання – осіб/с за умови, що коефіцієнт 1,8 має розмірність осіб/(с·м).

Час проходження евакуаційного виходу визначають за формулою:

$$T_{exit} = \frac{N_{people}}{Q_{exit}} \quad (15)$$

де N_{people} – кількість евакуйованих осіб;
Q_{exit} – пропускна здатність евакуаційного виходу, осіб/с.

Пропускну здатність евакуаційного виходу обчислюють за формулою:

$$Q_{exit} = q \times B_{exit} \times K_{mob} \quad (16)$$

де q – питома пропускна здатність потоку через вихід, осіб/(с·м);
B_{exit} – ширина евакуаційного виходу, м;
K_{mob} – коефіцієнт мобільності.

На цьому етапі кількість евакуйованих осіб співвідносять із пропускною здатністю виходу, визначаючи необхідний час його проходження.

Після визначення всіх складових обчислюють загальний час евакуації T_{total} за формулою (2).

Таким чином, розрахунок часу евакуації охоплює послідовне визначення параметрів руху евакуйованої групи, тривалості проходження окремих ділянок маршруту та пропускної здатності евакуаційного виходу. До розрахункового часу руху додають передевакуаційний час, отримуючи повний розрахунковий час евакуації.

Програмний комплекс розроблено в середовищі Visual Studio Code (Microsoft, США) мовою Python. Графічний інтерфейс користувача реалізовано за допомогою бібліотеки Tkinter. Програма передбачає введення кількості людей, довжини коридору, номера поверху, висоти поверху, ширини сходів, коефіцієнта захаращеності, а також часток дітей, людей похилого віку й осіб з інвалідністю у відсотках. Перед розрахунком перевіряють повноту введених даних і допустимість їхніх значень.

Результати дослідження

Для забезпечення відтворюваності розрахунків та можливості перевірки отриманих результатів у табл. 2 наведено вихідні параметри базового розрахункового сценарію, використаного під час моделювання. Зазначені параметри визначають характеристики будівлі, склад евакуаційної групи та умови її руху.

Таблиця 2. Вихідні параметри базового розрахункового сценарію

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання
Кількість евакуйованих осіб	N	35	осіб
Кількість поверхів	N_f	N_f5	поверхів
Довжина горизонтальної ділянки	L_{corr}	20	м
Висота поверху	H_f	2,5	м
Ширина сходової ділянки	B	1,5	м
Коефіцієнт захаращеності	K_z	1,0	-
Частка дітей	P_d	0	%

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання
Частка людей похилого віку	P_e	0	%
Частка осіб з інвалідністю	P_i	0	%
Базова швидкість горизонтального руху	V_o	0,9	м/с
Базова швидкість руху сходами	V_s	0,4	м/с
Час проходження одного сходового майданчика	t_{plat}	10	с
Кут нахилу сходів	α	40	°
Час реакції	T_{react}	30-60	с

Джерело: розроблено авторами за результатами моделювання.

Розрахунок часу евакуації реалізовано у вигляді послідовного алгоритму, який забезпечує поетапне опрацювання вихідних даних, розрахунок параметрів руху та формування кінцевого результату. Загальну послідовність роботи програмного комплексу наведено на рис. 1.

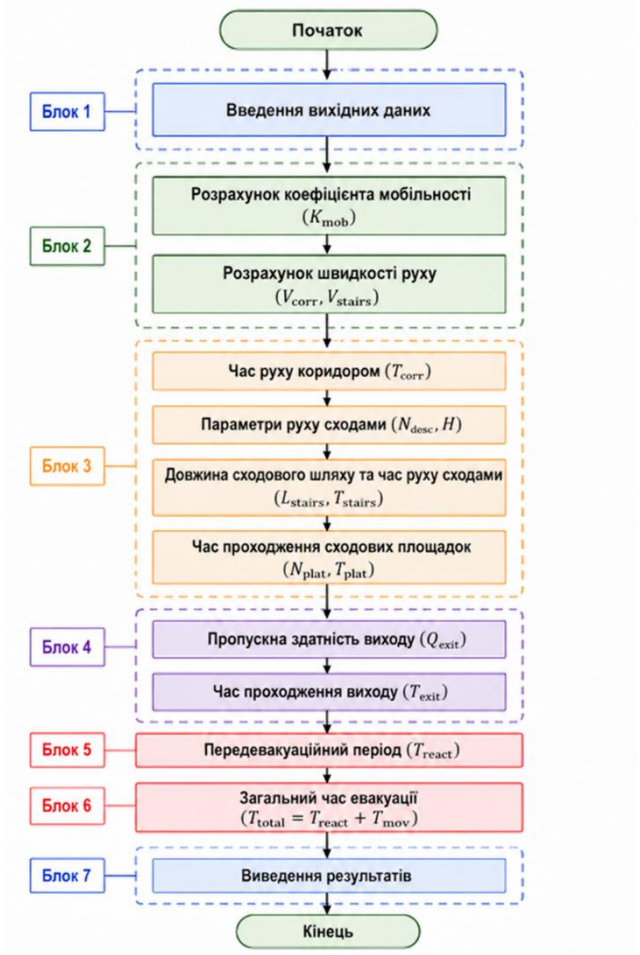


Рисунок 1. Алгоритм роботи програмного комплексу з визначення розрахункового часу евакуації людей

Блок 1 – Введення вихідних даних; Блок 2 – Розрахунок коефіцієнта мобільності та швидкостей руху; Блок 3 – Розрахунок часу руху коридором, параметри спуску сходами, довжини сходового шляху та часу руху сходами, часу проходження сходових площадок; Блок 4 – Розрахунок пропускної здатності та часу проходження виходу; Блок 5 – Розрахунок передевакуаційного періоду; Блок 6 – Визначення загального часу евакуації; Блок 7 – Виведення результатів.

Розроблена програма призначена для визначення розрахункового часу евакуації людей з будівель та споруд з урахуванням параметрів шляхів евакуації, особливостей

людського потоку та соціально-вікового складу евакуйованих осіб. Методика базується на припущенні про впорядковану евакуацію під керівництвом відповідальних осіб без виникнення паніки та хаотичного руху натовпу.

На першому етапі (Блок 1) користувач вводить вихідні дані, необхідні для проведення розрахунку. До них належать загальна кількість людей у будівлі, довжина коридору до евакуаційного виходу, кількість поверхів, які необхідно подолати під час евакуації, висота одного поверху, ширина сходового маршу або евакуаційного виходу, коефіцієнт захаращеності шляхів евакуації, а також кількість дітей, людей похилого віку та осіб з інвалідністю. Після введення даних виконується перевірка їх коректності та відповідність встановленим обмеженням. Також визначається соціально-віковий склад людського потоку. Кількість дорослих осіб працездатного віку розраховується як різниця між загальною кількістю евакуйованих та сумою дітей, людей похилого віку й осіб з інвалідністю. Такий підхід дозволяє врахувати неоднорідність людського потоку та різницю в мобільності окремих категорій населення.

Другий етап передбачає розрахунок коефіцієнта мобільності людського потоку (Блок 2). Для цього кожній соціально-віковій групі присвоюється умовний коефіцієнт, що характеризує її середню здатність до пересування під час евакуації. Для дорослих він приймається рівним 1,0, для дітей – 0,8, для людей похилого віку – 0,7, а для осіб з інвалідністю – 0,4. На основі чисельності кожної групи визначається середньозважений коефіцієнт мобільності, який надалі використовується для подальшого визначення параметрів руху.

Далі в цьому блоці визначається ефективна швидкість. Базова швидкість руху по коридору приймається рівною 0,9 м/с, а швидкість руху сходами – 0,4 м/с. Для врахування реальних умов пересування ці значення коригуються за допомогою коефіцієнта мобільності людського потоку та коефіцієнта захаращеності шляхів евакуації. У результаті отримуються ефективні швидкості руху коридором V_{corr} та сходами V_{stairs}.

На їх основі визначається час проходження коридору T_{corr} (Блок 3). Для цього довжина коридору ділиться на ефективну швидкість руху по горизонтальній ділянці. Отримане значення характеризує час, необхідний для проходження евакуаційного маршруту від місця перебування людей до сходової клітки або виходу.

Далі розраховується час руху сходами. Спочатку визначається загальна вертикальна висота спуску як добуток кількості поверхів, які необхідно подолати, на висоту одного поверху. Потім, враховуючи кут нахилу сходів у 40°, обчислюється фактична довжина сходового маршруту. На основі ефективної швидкості руху сходами визначається час, необхідний для його проходження.

Також враховується вплив сходових площадок. Вважається, що між кожними двома поверхами необхідно пройти дві площадки. Для кожної із них приймається додатковий час проходження, що становить 10 секунд. Загальний час проходження площадок додається до часу руху сходами.

Наступний етап (Блок 4) передбачає оцінювання часу проходження евакуаційного виходу. Для цього визначається пропускна здатність виходу, яка залежить від його ширини, коефіцієнта захаращеності та коефіцієнта мобільності людського потоку. Після цього загальна кількість людей ділиться на отриману пропускну здатність, що дозволяє визначити час, необхідний для проходження всіх евакуйованих через вихід. Також на цьому етапі обчислюється час безпосереднього руху людей після початку евакуації. Він визначається як сума часу проходження коридору, часу руху сходами, часу проходження сходових площадок та часу проходження евакуаційного виходу.

На наступному етапі (Блок 5) враховується передевакуаційний період, тобто час реакції людей на сигнал тривоги. Виходячи з особливостей сприйняття та швидкості прийняття рішень різними категоріями населення, для дорослих приймається інтервал реакції від 30 до 60 секунд, для дітей – від 90 до 120 секунд, для людей похилого віку – від 90 до 120 секунд, а для

осіб з інвалідністю – від 120 до 150 секунд. Оскільки завершення евакуації визначається виходом останньої особи, для розрахунку використовується максимальний час реакції серед тих категорій населення, які присутні у будівлі. Таким чином формується мінімальна та максимальна оцінка передевакуаційного часу.

На завершальному етапі (Блок 6) визначається повний час евакуації. Для цього до розрахованого часу руху додається мінімальний і максимальний час реакції людей на сигнал тривоги. У результаті отримується діапазон можливих значень часу евакуації, що дозволяє врахувати невизначеність поведінки людей на початковому етапі надзвичайної ситуації.

Результати розрахунків (Блок 7) використовуються для визначення повного часу евакуації та виводяться користувачеві у секундах і хвилинах.

У результаті роботи програми користувач отримує інформацію про склад людського потоку, коефіцієнт мобільності, швидкість руху на окремих ділянках маршруту, час проходження кожного елемента шляху евакуації, критичну соціально-вікову групу, діапазон часу реакції на сигнал тривоги та мінімальний і максимальний повний час евакуації. Запропонований алгоритм дозволяє здійснювати попередню оцінку ефективності евакуації з урахуванням як параметрів будівлі, так і особливостей контингенту людей, що перебувають у ній.

Загальний вигляд інтерфейсу програмного комплексу представлено на рис. 2.

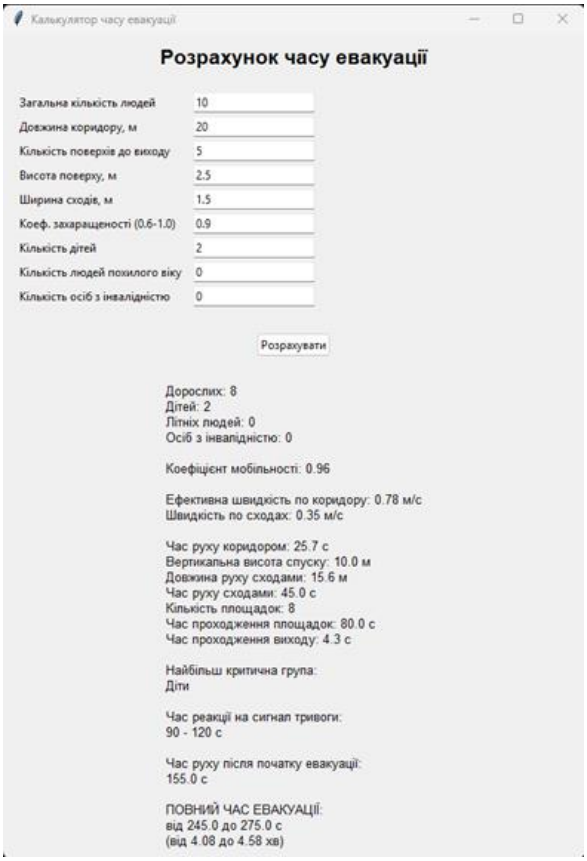


Рисунок 2. Загальний вигляд інтерфейсу програмного комплексу з визначення часу евакуації людей

Для перевірки роботи розробленого програмного комплексу було проведено моделювання часу евакуації за різних значень чисельності евакуйованих осіб та коефіцієнта захаращеності шляхів евакуації. На першому етапі було досліджено залежність розрахункового часу евакуації людей з п’ятого поверху від кількості евакуйованих осіб за різних значень коефіцієнта захаращеності проходів. Результати розрахунків наведено на рис. 3.

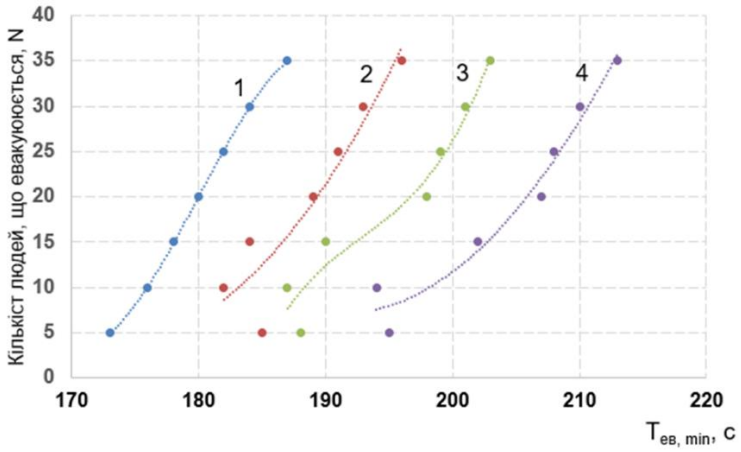


Рисунок 3. Залежність розрахункового часу евакуації від кількості людей за різної частки дітей у складі евакуаційної групи: 1 – без дітей; 2 – 10 % дітей; 3 – 20 % дітей; 4 – 30 % дітей.

За результатами моделювання збільшення частки дітей у складі евакуаційної групи супроводжується зміщенням залежності у бік більших значень розрахункового часу евакуації. За однакової чисельності евакуйованих осіб більша частка дітей відповідає більшому значенню розрахункового часу. Найменші значення часу відповідають сценарію без дітей, тоді як найбільші значення спостерігаються для групи з часткою дітей 30 %.

У межах запропонованої моделі така зміна пов'язана з урахуванням складу евакуаційної групи через коефіцієнт мобільності K_{mob}. Зі збільшенням частки дітей змінюється середньозважене значення коефіцієнта мобільності, що впливає на розрахункові швидкості руху та пропускну здатність евакуаційного маршруту. Отримана залежність характеризує результат прийнятого способу врахування складу групи в моделі та потребує подальшої перевірки за експериментальними або натурними даними.

Для оцінювання впливу стану шляхів евакуації на розрахунковий час було досліджено залежність тривалості евакуації від чисельності евакуйованих осіб за різних значень коефіцієнта захаращеності. Розглянуто п'ять значень коефіцієнта K_z: 1,0; 0,9; 0,8; 0,7 та 0,6. Результати розрахунків наведено на рис. 4.

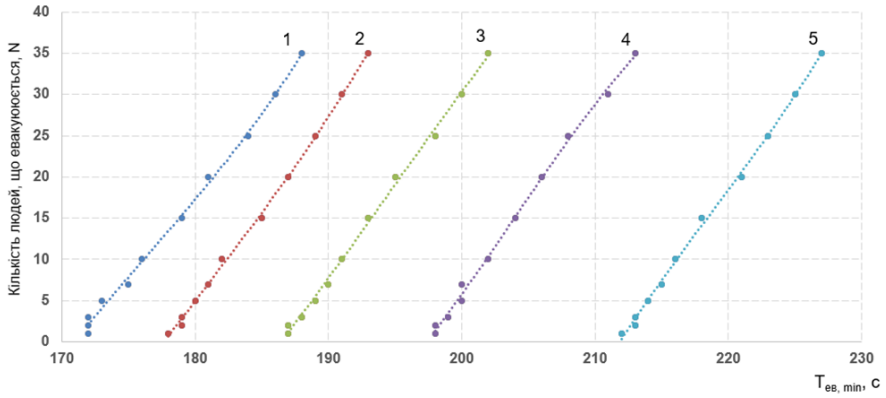


Рисунок 4. Залежність розрахункового часу евакуації від кількості людей за різних значень коефіцієнта захаращеності: 1 – 1,0; 2 – 0,9; 3 – 0,8; 4 – 0,7; 5 – 0,6.

Аналіз отриманих залежностей показує, що для всіх досліджуваних значень коефіцієнта захаращеності зі збільшенням чисельності евакуйованих осіб розрахунковий час евакуації зростає. Зменшення значення K_z від 1,0 до 0,6 супроводжується зміщенням залежності у бік

більших значень часу евакуації. Найменші значення розрахункового часу відповідають вільним або менш захаращеним шляхам евакуації, тоді як за погіршення умов проходження маршруту час евакуації збільшується.

Отриманий результат відповідає закладеному в модель способу врахування перешкод, за якого зменшення коефіцієнта захаращеності знижує розрахункову швидкість руху та пропускну здатність евакуаційного маршруту. Таким чином, коефіцієнт K_z є одним із параметрів, що безпосередньо впливають на розрахунковий час евакуації в межах запропонованої моделі.

Для оцінювання чутливості розрахункового часу евакуації до прийнятого значення коефіцієнта мобільності K_{mob} проведено додатковий розрахунок. При цьому параметри будівлі, чисельність евакуйованих осіб, коефіцієнт захаращеності та склад групи залишалися незмінними, а значення K_{mob} послідовно змінювалося від 0,6 до 1,0. Оскільки модель визначає мінімальний та максимальний повний час евакуації залежно від інтервалу передевакуаційного періоду, результати наведено окремо для обох меж розрахункового часу в табл. 3.

Таблиця 3. Залежність розрахункового часу евакуації від значення коефіцієнта мобільності

Коефіцієнт мобільності K_{mob}	Мінімальний повний час евакуації, *с*	Максимальний повний час евакуації, *с*
0,6	233,5	263,5
0,7	215,8	245,8
0,8	202,6	232,6
0,9	192,3	222,3
1,0	184,1	214,1

Джерело: розроблено авторами за результатами моделювання.

Аналіз результатів показує, що зі збільшенням коефіцієнта мобільності від 0,6 до 1,0 розрахунковий час евакуації послідовно зменшується. Мінімальний повний час евакуації зменшується з 233,5 до 184,1 с, а максимальний – з 263,5 до 214,1 с. Таким чином, зміна коефіцієнта мобільності від 0,6 до 1,0 спричиняє зменшення розрахункового часу на 49,4 с для обох меж передевакуаційного інтервалу, що відповідає приблизно 21,2 % від мінімального та 18,7 % від максимального значення при K_{mob} =0,6. Отриманий результат свідчить про чутливість розрахункового часу евакуації до прийнятого значення коефіцієнта мобільності.

Обговорення

Отримані результати підтверджують можливість використання розробленого програмного комплексу для оцінювання впливу основних параметрів евакуації на розрахунковий час виходу людей із будівлі. Запропонований підхід поєднує розрахунок параметрів руху з урахуванням стану шляхів евакуації та соціально-демографічного складу евакуаційної групи, що дає змогу оцінювати час евакуації за різних заданих умов.

Результати моделювання показали, що стан шляхів руху є одним із суттєвих факторів, які визначають тривалість евакуації. Зменшення коефіцієнта захаращеності супроводжується збільшенням розрахункового часу евакуації, при цьому характер залежностей від чисельності людей залишається близьким до лінійного. Такий результат відповідає логіці розрахункової моделі, у якій погіршення умов проходження маршруту впливає на параметри руху та, відповідно, на загальну тривалість евакуації.

Отримані результати також підтверджують значущість врахування соціально-демографічної структури евакуаційної групи [14]. На відміну від більшості інженерних моделей, у яких усі люди розглядаються як однорідний потік, запропонований підхід враховує різний рівень мобільності окремих категорій населення. Аналіз сценарію за наявності дітей

показав виникнення нелінійної залежності часу евакуації від чисельності групи. Це свідчить про те, що склад людського потоку в окремих випадках може впливати на результати розрахунку не менше, ніж геометричні параметри будівлі. Така закономірність узгоджується з висновками досліджень, у яких підкреслюється важливість урахування поведінкових та індивідуальних характеристик людей під час моделювання евакуаційних процесів.

Запропонований підхід відрізняється від складніших моделей евакуації насамперед рівнем деталізації та вимогами до вихідних даних. На відміну від таких систем, як Pathfinder та інших засобів мікроскопічного моделювання, програмний комплекс не передбачає детального опису геометрії кожного приміщення, індивідуальних траєкторій руху та великої кількості поведінкових параметрів, характерних для агентних і мікроскопічних моделей. Це визначає його основне призначення як інструменту оперативної попередньої оцінки часу евакуації для конкретного об’єкта за заданими параметрами.

Разом із тим запропонований підхід має низку обмежень, пов’язаних із прийнятими спрощеннями. У моделі не враховуються зустрічні потоки людей, панічна поведінка [22], утворення критичних скупчень біля виходів, зміна напрямків руху, вплив задимлення на орієнтування людей та динамічне погіршення умов евакуації внаслідок розвитку небезпечних факторів пожежі [23]. Крім того, використані коефіцієнти мобільності та часові інтервали реагування мають узагальнений характер і можуть потребувати уточнення залежно від типу об’єкта та характеристик контингенту людей.

Отримані результати показують, що запропонований алгоритм забезпечує зміну розрахункового часу відповідно до зміни заданих параметрів евакуаційного процесу. Водночас запропонована модель призначена насамперед для виконання інженерних оцінок і потребує подальшої валідації за результатами натурних спостережень, евакуаційних тренувань та порівняння з результатами спеціалізованих програмних комплексів. Кількісне визначення похибки всієї моделі потребує окремого дослідження.

Кількісне порівняння з результатами попередніх досліджень

Необхідність кількісної перевірки розрахункових моделей за експериментальними даними підтверджується результатами попередніх досліджень. Зокрема, Zhang et al. [25] проводили експериментальні дослідження евакуації зі сходів та порівнювали отримані результати з даними моделювання у Pathfinder. У цій роботі для перевірки запропонованого підходу виконано кількісне зіставлення окремих базових параметрів моделі з незалежними експериментальними даними [24].

Для оцінювання узгодженості базових швидкостей, прийнятих у моделі, із незалежними експериментальними даними використано результати дослідження евакуаційної поведінки дітей віком 4–6 років у триповерховому будинку дитячого садка [24]. За результатами експерименту середня швидкість руху дітей на горизонтальній ділянці становила 0,87 м/с, а під час руху сходами – 0,55 м/с. У запропонованій моделі як базові значення прийнято відповідно 0,9 та 0,4 м/с. Для їх кількісного зіставлення визначено абсолютне та відносне відхилення значень, прийнятих у моделі, від експериментальних даних. Результати наведено в табл. 4.

Таблиця 4. Кількісне порівняння базових швидкостей моделі з експериментальними даними

Параметр	Експериментальне значення, м/с	Значення, прийняте в моделі, м/с	Абсолютне відхилення, м/с	Відносне відхилення, %
Швидкість руху горизонтальною ділянкою	0,87	0,90	0,03	3,4
Швидкість руху сходами	0,55	0,40	0,15	27,3

Джерело: складено авторами на основі експериментальних даних [24] та власних розрахунків.

Порівняння показало, що значення базової швидкості горизонтального руху, прийняте в моделі, близьке до експериментального: відносне відхилення становить 3,4 %. Для сходової ділянки відносне відхилення є більшим і становить 27,3 %, при цьому прийняте в моделі значення 0,4 м/с є нижчим за експериментальне середнє значення 0,55 м/с [24]. Отримані результати свідчать про достатню близькість прийнятого значення для горизонтального руху, водночас базова швидкість руху сходами потребує додаткового обґрунтування та уточнення за результатами подальших експериментальних або натурних досліджень. Наведене порівняння стосується окремих параметрів моделі та не може розглядатися як повна валідація запропонованого розрахункового підходу.

Припущення та обмеження моделі

Запропонований розрахунковий підхід ґрунтується на припущенні про організований рух людей за визначеними маршрутами евакуації. У моделі не враховуються зустрічні потоки людей, утворення критичних скупчень біля виходів, панічна поведінка [22], динамічна зміна маршруту під час евакуації та складна взаємодія між окремими учасниками потоку.

Розрахунок також не враховує динамічних змін параметрів небезпечних факторів пожежі, зокрема температури, задимлення та концентрації токсичних продуктів горіння [23]. Тому в межах запропонованої моделі розрахунковий час евакуації визначається переважно характеристиками маршруту, чисельністю та складом евакуаційної групи, а також прийнятими параметрами руху.

Зазначені припущення визначають межі застосування моделі. За складних сценаріїв евакуації, що супроводжуються значним скупченням людей, зміною доступності маршрутів, зустрічними потоками або динамічним погіршенням умов, отримані результати слід розглядати як інженерну розрахункову оцінку, що потребує додаткової перевірки за результатами експериментальних або натурних досліджень.

Практична цінність розробленого програмного комплексу полягає в можливості швидко порівнювати різні сценарії евакуації та визначати параметри, які найбільше впливають на її тривалість. Отримані результати можуть бути використані для попереднього оцінювання умов евакуації, порівняння варіантів організації шляхів руху та визначення доцільності заходів, спрямованих на усунення перешкод і підвищення пропускної здатності евакуаційних шляхів.

Подальше дослідження доцільно спрямувати на перевірку запропонованої моделі за результатами натурних евакуаційних тренувань та порівняння отриманих результатів із даними, отриманими за допомогою спеціалізованих програмних комплексів моделювання. Перспективним напрямом подальшого вдосконалення моделі є уточнення коефіцієнтів мобільності для різних категорій евакуйованих на основі експериментальних і натурних даних. Також доцільним є розширення алгоритму шляхом урахування задимлення, зміни видимості, небезпечних факторів пожежі, наявності кількох евакуаційних виходів та адаптивних поведінкових реакцій людей.

Запропонована модель має характер інженерної оцінки та не претендує на повне відтворення поведінки людського потоку в реальних умовах надзвичайних ситуацій. Програмний комплекс доцільно розглядати як прототип системи підтримки прийняття рішень під час попереднього оцінювання евакуації, структура якого дає змогу в подальшому уточнювати використані коефіцієнти та розширювати алгоритм без зміни його загальної логіки.

Висновки

Удосконалено інженерний підхід до попереднього оцінювання часу евакуації людей шляхом інтегрованого врахування передевакуаційного періоду, стану шляхів евакуації та соціально-демографічної неоднорідності евакуаційної групи. Соціально-демографічний склад групи враховується через узагальнений коефіцієнт мобільності, який використовується під час

розрахунку швидкості руху та пропускної здатності. На основі запропонованого підходу розроблено програмний комплекс для оперативного розрахункового оцінювання часу евакуації.

Моделювання показало, що час евакуації зростає зі збільшенням чисельності групи та погіршенням умов проходження маршруту. Встановлено суттєвий вплив коефіцієнта захаращеності шляхів евакуації на тривалість евакуації, а також підтверджено необхідність урахування соціально-демографічного складу групи, зокрема присутності дітей. Аналіз чутливості показав, що зміна прийнятого коефіцієнта мобільності K_{mob} за незмінних інших параметрів розрахунку безпосередньо впливає на розрахунковий час евакуації: зі збільшенням K_{mob} від 0,6 до 1,0 розрахунковий час зменшується. Результати мають характер інженерної оцінки та потребують подальшої валідації.

Перспективними напрямами подальшої роботи є перевірка моделі за даними натурних евакуаційних тренувань, порівняння результатів із даними спеціалізованих програмних комплексів та розширення алгоритму з урахуванням небезпечних факторів пожежі, задимлення, кількості евакуаційних виходів і поведінки людей.

Подяки

Колектив авторів висловлює подяку НТУ “Дніпровська політехніка” за технічну допомогу у створенні програмного комплексу.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів.

Використання штучного інтелекту

Автори заявляють, що використовували ШІ для перевірки правопису та пошуку ресурсів.

Список використаних джерел

1. Martinez S.-K., Pompeo M., Sheremeta R. M., Vakhitov V., Weber M., Zaika N. Civilian evacuation during war: Evidence from Ukraine // *The Economic Journal*. 2026. Vol. 136, No. 675. P. 1155-1171. DOI: https://doi.org/10.1093/ej/ueaf075
2. Hui Y., Yu Q., Peng H. Data-driven mathematical simulation analysis of emergency evacuation time in smart station’s operations management // *PLOS ONE*. 2024. Vol. 19, No. 2. Article e0298622. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0298622
3. Islas-Toski M., Cuevas E., Pérez-Cisneros M., Escobar H. Agent-based evacuation modeling: Enhancing building safety in emergency scenarios // *Smart Cities*. 2024. Vol. 7, No. 6. P. 3165-3187. DOI: https://doi.org/10.3390/smartcities7060123
4. Yan J., He G., Basiri A., Hancock C., Yeboah S. K. The impact of postures and moving directions in fire evacuation in a low-visibility environment // *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 5. Article 1378. DOI: https://doi.org/10.3390/s24051378
5. Aryaeinezhad A., Bahramian Z. Evacuation simulation in indoor environment using social force model // *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2026. Vol. X-4/W8-2025. P. 99-107. DOI: https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W8-2025-99-2026
6. Minegishi Y. Occupant evacuation elevators as a measure for crowd management and evacuation for people with mobility impairments in high-rise buildings // *Japan Architectural Review*. 2021. Vol. 4. P. 391-402. DOI: https://doi.org/10.1002/2475-8876.12219

7. Jiang Y., Liu G., Du Y., Cai S., Si Z., He J., Zhou X. Analysis and optimization of fire evacuation safety performance in large urban complexes // *PLOS ONE*. 2025. Vol. 20, No. 11. Article e0336964. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0336964
8. Kim H., Haam S., Yoo M., Song W. S. Algorithmic evaluation of fire evacuation efficiency under dynamic crowd and smoke conditions // *Fire*. 2026. Vol. 9, No. 1. Article 32. DOI: https://doi.org/10.3390/fire9010032
9. Кодекс цивільного захисту України: Кодекс України від 02.10.2012 № 5403-VI. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/5403-17 (дата звернення: 16.09.2026).
10. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3883979565969704701 (дата звернення: 16.09.2026).
11. Chen J., Shi T., Li N. Pedestrian evacuation simulation in indoor emergency situations: Approaches, models and tools // *Safety Science*. 2021. Vol. 142. Article 105378. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105378
12. Ivanov M. L., Chow W. K. Experimental and numerical evacuation study in tall office building // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 76. Article 107103. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107103
13. Wang L., Shen S. A decay model for the fundamental diagram of pedestrian movement // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2019. Vol. 531. Article 121739. DOI: https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.121739
14. Wang Y., Kyriakidis M., Dang V. N. Incorporating human factors in emergency evacuation: An overview of behavioral factors and models // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2021. Vol. 60. Article 102254. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102254
15. Lu T., Zhao Y., Wu P., Zhu P. Pedestrian ascent and descent behavior characteristics during staircase evacuation under invisible conditions // *Safety Science*. 2021. Vol. 143. Article 105441. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105441
16. Xie W., Zhang Y.-C., Cheng Y.-Y., Chen S.-M., Liang X.-W., Zhang W.-B. Experimental study on movement speed and route choice of individuals and small groups under different visibility conditions // *Procedia Engineering*. 2018. Vol. 211. P. 830-836. DOI: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.081
17. Spearpoint M., Arnott M., Xie H., Gwynne S., Templeton A. Comparative analysis of two evacuation simulation tools when applied to high-rise residential buildings // *Safety Science*. 2024. Vol. 175. Article 106515. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106515
18. Cuesta A., Ronchi E., Gwynne S. M. V., Kinsey M. J., Hunt A. L. E., Alvear D. School egress data: Comparing the configuration and validation of five egress modelling tools // *Fire and Materials*. 2017. Vol. 41, No. 5. P. 535-554. DOI: https://doi.org/10.1002/fam.2405
19. Daniels S., Bailey B., Wainwright R., Daniels G. Physical and behavioural factors that influence evacuation times of elderly people: A systematic literature review [Preprint]. TechRxiv. 2024. DOI: https://doi.org/10.36227/techrxiv.172107460.02342717/v1
20. Brzezińska D., Barański M., Bryant P., Haznar-Barańska A. The safe evacuation of persons from a building operating within COVID-19 restrictions // *Building Services Engineering Research and Technology*. 2022. Vol. 43, No. 4. P. 461-472. DOI: https://doi.org/10.1177/01436244221074542
21. Echeverría-Huarte I., Shi Z., Garcimartín A., Zuriguel I. Pedestrian bottleneck flow when keeping a prescribed physical distance // *Physical Review E*. 2022. Vol. 106, No. 4. Article 044302. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevE.106.044302
22. Trivedi A., Rao S. Agent-based modeling of emergency evacuations considering human panic behavior // *IEEE Transactions on Computational Social Systems*. 2018. Vol. 5, No. 1. P. 277-288. DOI: https://doi.org/10.1109/TCSS.2017.2783332

23. Ronchi E., Corbetta A., Galea E. R., Kinateder M., Kuligowski E., McGrath D., Pel A., Shiban Y., Thompson P., Toschi F. New approaches to evacuation modelling for fire safety engineering applications // *Fire Safety Journal*. 2019. Vol. 106. P. 197-209. DOI: https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.05.002
24. Yao Y., Lu W., Wang L. Experimental study on evacuation behaviour of children in a three-storey kindergarten // *Heliyon*. 2023. Vol. 9, No. 6. Article e16533. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16533
25. Zhang Q., Yu F., Gao S., Chang C., Zhang X. Experimental and numerical study on rapid evacuation characteristics of staircases in campus buildings. Buildings. 2022. Vol. 12, No. 6. P. 848. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings12060848

References

1. Martinez, S.-K., Pompeo, M., Sheremeta, R. M., Vakhitov, V., Weber, M., & Zaika, N. (2026). Civilian evacuation during war: Evidence from Ukraine. *The Economic Journal, 136*(675), 1155-1171. https://doi.org/10.1093/ej/ueaf075
2. Hui, Y., Yu, Q., & Peng, H. (2024). Data-driven mathematical simulation analysis of emergency evacuation time in smart station's operations management. *PLOS ONE, 19*(2), e0298622. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0298622
3. Islas-Toski, M., Cuevas, E., Pérez-Cisneros, M., & Escobar, H. (2024). Agent-based evacuation modeling: Enhancing building safety in emergency scenarios. *Smart Cities, 7*(6), 3165-3187. https://doi.org/10.3390/smartcities7060123
4. Yan, J., He, G., Basiri, A., Hancock, C., & Yeboah, S. K. (2024). The impact of postures and moving directions in fire evacuation in a low-visibility environment. *Sensors, 24*(5), 1378. https://doi.org/10.3390/s24051378
5. Aryaeinezhad, A., & Bahramian, Z. (2026). Evacuation simulation in indoor environment using social force model. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, X-4/W8-2025*, 99-107. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W8-2025-99-2026
6. Minegishi, Y. (2021). Occupant evacuation elevators as a measure for crowd management and evacuation for people with mobility impairments in high-rise buildings. *Japan Architectural Review, 4*, 391-402. https://doi.org/10.1002/2475-8876.12219
7. Jiang, Y., Liu, G., Du, Y., Cai, S., Si, Z., He, J., & Zhou, X. (2025). Analysis and optimization of fire evacuation safety performance in large urban complexes. *PLOS ONE, 20*(11), e0336964. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0336964
8. Kim, H., Haam, S., Yoo, M., & Song, W. S. (2026). Algorithmic evaluation of fire evacuation efficiency under dynamic crowd and smoke conditions. *Fire, 9*(1), 32. https://doi.org/10.3390/fire9010032
9. Verkhovna Rada of Ukraine. (2012). *Civil Protection Code of Ukraine No. 5403-VI of October 2, 2012 (as amended).* https://zakon.rada.gov.ua/go/5403-17
10. State Building Codes of Ukraine. (2016). *DBN V.1.1-7:2016. Fire safety of construction facilities. General requirements.* https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3883979565969704701
11. Chen, J., Shi, T., & Li, N. (2021). Pedestrian evacuation simulation in indoor emergency situations: Approaches, models and tools. *Safety Science, 142*, 105378. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105378
12. Ivanov, M. L., & Chow, W. K. (2023). Experimental and numerical evacuation study in tall office building. *Journal of Building Engineering, 76*, 107103. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107103

13. Wang, L., & Shen, S. (2019). A decay model for the fundamental diagram of pedestrian movement. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 531*, 121739. https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.121739
14. Wang, Y., Kyriakidis, M., & Dang, V. N. (2021). Incorporating human factors in emergency evacuation: An overview of behavioral factors and models. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 60*, 102254. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102254
15. Lu, T., Zhao, Y., Wu, P., & Zhu, P. (2021). Pedestrian ascent and descent behavior characteristics during staircase evacuation under invisible conditions. *Safety Science, 143*, 105441. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105441
16. Xie, W., Zhang, Y.-C., Cheng, Y.-Y., Chen, S.-M., Liang, X.-W., & Zhang, W.-B. (2018). Experimental study on movement speed and route choice of individuals and small groups under different visibility conditions. *Procedia Engineering, 211*, 830-836. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.081
17. Spearpoint, M., Arnott, M., Xie, H., Gwynne, S., & Templeton, A. (2024). Comparative analysis of two evacuation simulation tools when applied to high-rise residential buildings. *Safety Science, 175*, 106515. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106515
18. Cuesta, A., Ronchi, E., Gwynne, S. M. V., Kinsey, M. J., Hunt, A. L. E., & Alvear, D. (2017). School egress data: Comparing the configuration and validation of five egress modelling tools. *Fire and Materials, 41*(5), 535-554. https://doi.org/10.1002/fam.2405
19. Daniels, S., Bailey, B., Wainwright, R., & Daniels, G. (2024). *Physical and behavioural factors that influence evacuation times of elderly people: A systematic literature review* [Preprint]. TechRxiv. https://doi.org/10.36227/techrxiv.172107460.02342717/v1
20. Brzezińska, D., Barański, M., Bryant, P., & Haznar-Barańska, A. (2022). The safe evacuation of persons from a building operating within COVID-19 restrictions. *Building Services Engineering Research and Technology, 43*(4), 461-472. https://doi.org/10.1177/01436244221074542
21. Echeverría-Huarte, I., Shi, Z., Garcimartín, A., & Zuriguel, I. (2022). Pedestrian bottleneck flow when keeping a prescribed physical distance. *Physical Review E, 106*(4), 044302. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.106.044302
22. Trivedi, A., & Rao, S. (2018). Agent-based modeling of emergency evacuations considering human panic behavior. *IEEE Transactions on Computational Social Systems, 5*(1), 277-288. https://doi.org/10.1109/TCSS.2017.2783332
23. Ronchi, E., Corbetta, A., Galea, E. R., Kinateder, M., Kuligowski, E., McGrath, D., Pel, A., Shiban, Y., Thompson, P., & Toschi, F. (2019). New approaches to evacuation modelling for fire safety engineering applications. *Fire Safety Journal, 106*, 197-209. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.05.002
24. Yao, Y., Lu, W., & Wang, L. (2023). Experimental study on evacuation behaviour of children in a three-storey kindergarten. *Heliyon, 9*(6), e16533. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16533
25. Zhang, Q., Yu, F., Gao, S., Chang, C., & Zhang, X. (2022). Experimental and numerical study on rapid evacuation characteristics of staircases in campus buildings. Buildings, 12(6), 848. https://doi.org/10.3390/buildings12060848

This is an open access journal and all published articles are licensed under a Creative Commons «Attribution» 4.0.