

УДК 614.841

DOI: [https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1\(8\)-2\(9\)-206-215](https://www.doi.org/10.31474/2415-7902-2022-1(8)-2(9)-206-215)

С.В. Цвіркун, Т.В. Костенко, М.Ю. Удовенко

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАХИСТУ ЛЮДЕЙ ВІД НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ, ПОВ'ЯЗАНИХ З ПОЖЕЖАМИ В БУДІВЛЯХ, ЯКІ НАЛЕЖАТЬ ДО ОБ'ЄКТІВ КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ

Мета. *Забезпечення захисту людей від надзвичайних ситуацій, пов'язаних з пожежами в будівлях, які належать до об'єктів культурної спадщини, за допомогою математичного моделювання динамічних процесів і явищ, характерних для пожежі.*

Методи. *Для визначення небезпечних чинників пожежі був використаний програмний комплекс FDS, який чисельно вирішує рівняння Нав'є-Стокса для низькошвидкісних температурно-залежних потоків. Для розрахунку часу евакуації людей використовувалася аналітична модель руху людей під час пожежі.*

Результати. *За результатами проведеного моделювання були розраховані значення небезпечних чинників пожежі в об'ємі будівлі, а також визначено залежність показників від часу. Отримані дані ілюструють розповсюдження небезпечних чинників пожежі в приміщеннях із складною планувальною схемою. Вони необхідні для раціонального розміщення людей з метою підвищення їхньої безпеки в разі надзвичайної ситуації. Таким чином, завдяки математичному моделюванню, ми отримуємо інформацію яким саме заходам безпеки слід приділити особливу увагу.*

Наукова новизна. *отриманих результатів полягає в тому, що для умов саме таких параметрів об'ємно-планувальних рішень будівлі було визначено час настання критичного значення небезпечних чинників пожежі та час евакуації людей з приміщення.*

Практичне значення. *отриманих результатів полягає у можливості використання принципів та підходів, що викладено в роботі, для подібних об'єктів культурної спадщини для визначення необхідного часу евакуації, що дозволить підвищити безпеку відвідувачів та персоналу під час виникнення надзвичайної ситуації. У такого типу приміщеннях повинен бути зроблений особливий акцент на обладнанні візуальними вказівниками шляхів евакуації.*

Ключові слова: *небезпечні чинники пожежі, моделювання пожежі, евакуація людей під час пожежі.*

Вступ. Пам'яток архітектури на території сучасної України чимало. Нещодавнім гірким досвідом для архітектурної спадщини столиці України стали пожежі у 7 історичних будівлях, які горіли за останні 5 років [1]. За останні шість років історична садиба відомого українського художника Олександра Мурашка на Малій Житомирській горіла два рази. Останнього разу — у 2015 році. Причиною пожежі назвали необережне поводження з вогнем невідомих осіб. Садиба Мурашка є пам'ятником історії й архітектури середини ХІХ століття. У січні 2019 року рятувальники гасили пожежу в нежитловій триповерховій будівлі 1883 року на Грушевського, 4б. Ця будівля є прикладом первинної забудови вулиці Грушевського, яких залишилося лише кілька. 20 червня 2017 року на Хрещатику, 40/1 навпроти ЦУМу, горіла історична будівля колишнього Центрального гастроному. Там згоріли перекриття між поверхами і дах. Причиною пожежі назвали недбалість будівельників, які вели роботи в будівлі.

В сучасній практиці збереження культурної спадщини історичних міст України використовуються норми ДСТУ-Н Б В.3.2-4:2016 Настанова щодо виконання ремонтно-реставраційних робіт на пам'ятках архітектури та містобудування [2]. Зокрема, в пункті «Загальні положення» 1.2 визначено два головні принципи реставрації пам'ятки: «Принцип найменшого втручання та змін, забезпечення максимального збереження автентичності пам'ятки; принцип реверсивності, тобто всі застосовані матеріали і технології повинні бути максимально зворотними (підлягати видаленню без пошкодження автентичного матеріалу)». Окрім захисту життя

відвідувачів та персоналу, пожежна безпека в історичних будівлях та музеях – це питання збереження безцінної архітектури та артефактів.

Рішення проблем пожежної безпеки вимагає використання загальних принципів теорії розвитку горіння і різноманітних наукових методів, які має сучасна наука. Розвиток пожежі включає багато факторів, частину з яких важко передбачити, оскільки вони змінюються в часі і просторі. Для оцінки пожежної небезпеки того чи іншого об'єкту захисту та ефективного керування діями задля забезпечення пожежної безпеки необхідно з позиції сучасних наукових уявлень як можна глибше та детальніше пізнати закономірності виникнення, розвитку та ліквідації пожеж всіх класів і типів. Одним з оптимальних підходів вивчення таких систем є системний аналіз, який для вивчення складних систем включає метод моделювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Моделюванню процесів евакуації присвячено значну кількість сучасних наукових робіт. Для евакуації можуть використовувати різні підходи для моделювання поведінки людини під час пожежі. В роботі [3] розглядаються існуючі програми для розрахунку часу евакуації людей під час пожежі. Проведений порівняльний аналіз існуючих програмних комплексів в області розрахунків. Наведено порівняльний аналіз математичних методів закономірностей руху людей під час пожежі у програмних продуктах. Дано висновок щодо функціональності досліджуваних програмних комплексів. Одна з робіт містить критичний огляд найбільш часто використовуваних методів моделювання для представлення процесу евакуації під час пожежі. [4]. Інше дослідження [5] присвячене моделюванню індивідуально-поточного руху людей Побудовано модель індивідуально-поточного руху людей з уточненням технологічних обмежень. Експериментально досліджено ефект зміни значень середнього квадратичного відхилення швидкості фізичних осіб на процес евакуації. Показано, що зі збільшенням середнього квадратичного відхилення швидкості індивідів від його середнього значення, зазвичай, спостерігається розподіл потоку на групи, кожна з яких рухається з різною швидкістю, і збільшення часу евакуації, що обмежується отриманою верхньою оцінкою. Відомі також дослідження, під час яких було розроблено спрощену імітаційну модель для розрахунку часу евакуації на кожному поверсі будівлі, беручи до уваги будівлю з різними типами розміщення на різних поверхах (наприклад, офісні, житлові, комерційні тощо) і різні коефіцієнти об'єднання, які можуть бути викликані різною конфігурацією сходових дверей на кожному поверсі. [6]. В роботі [7] показано доцільність використання програмного комплексу FDS (FireDynamic Simulator) для моделювання динаміки розвитку небезпечних чинників пожежі.

Викликає занепокоєння стан організації належного догляду та утримання об'єктів культурної спадщини, виконання вимог чинного законодавства, зокрема в дотриманні протипожежних заходів, запропонованих у приписах інспекторів з нагляду за протипожежним станом. Залишаються невиконаними 80% протипожежних заходів, запропонованих приписами органів державного пожежного нагляду, термін виконання яких давно минув. Дуже часто, незважаючи на статус пам'ятки, який потребує отримання дозволу органів охорони культурної спадщини на проведення будь-яких робіт та погодження проектною документації, реставраційних завдань, релігійні громади нехтують цією вимогою, здійснюють самовільні ремонтні роботи не усвідомлюючи, що такі дії спотворюють пам'ятки та сприяють їх руйнуванню, призводять до безповоротних втрат їх історичної автентичності, а в деяких випадках – до пожеж [8].

Мета статті – забезпечення захисту людей від надзвичайних ситуацій, пов'язаних з пожежами в будівлях, які належать до об'єктів культурної спадщини, за допомогою математичного моделювання динамічних процесів і явищ, характерних для пожежі.

Для досягнення мети необхідно виконати наступні задачі:

- проаналізувати шляхи евакуації в рамках об'ємно-планувальних рішень будівлі;
- провести розрахунок необхідного та фактичного часу евакуації відвідувачів;
- визначити особливості евакуації з будівель, які належать до об'єктів культурної спадщини.

Методи дослідження. Основними сучасними підходами до дослідження безпечної евакуації людей є комп'ютерне моделювання з використанням програм обчислювальної гідродинаміки (CFD). Для визначення небезпечних чинників пожежі був використаний програмний комплекс FDS [9]. FDS чисельно вирішує рівняння Нав'є-Стокса для низькошвидкісних температурно-залежних потоків, особлива увага приділяється поширенню диму і теплопередачі при пожежі. Математична модель FDS базується на використанні диференціальних рівнянь в приватних похідних, що описують просторово-часовий розподіл температури і швидкостей газового середовища в приміщенні, концентрацій компонентів газового середовища (кисню, продуктів горіння тощо), тисків і щільності.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом дослідження безпечної евакуації людей в умовах надзвичайних ситуацій є будівля, що має історичне значення - Повітрофлотський проспект № 28 (1914—1918) — будівля колишнього Миколаївського артилерійського училища (місто Київ). В даний час в цій будівлі знаходиться Касаційний цивільний суд — складова частина Верховного Суду, що здійснює касаційне провадження у справах, що виникають з цивільних, земельних, трудових, сімейних, житлових та інших приватних до них правовідносин на території України.

Особливістю пожежної безпеки є те, що будівля відноситься до будівель із складним плануванням приміщень та поверхів. Організаційні заходи по забезпеченню евакуації людей при пожежі, як правило, недостатні.

Вибір місця розвитку сценарію пожежі. Осередки пожежі були обрані таким чином щоб або блокувати один із евакуаційних виходів, або створювати складні умови для евакуації. Так пожежа розвивається по найгіршому сценарію приймаємо, що система автоматичного пожежогасіння, якою обладнані приміщення Верховного суду, не спрацювала. Провівши аналіз креслень, схем та концепції забезпечення протипожежного захисту будівлі, було прийняте рішення провести розрахунки часу евакуації та настання небезпечних чинників пожежі з кожного поверху. Для цього було створено модель будівлі де і реалізовувалися сценарії пожеж (рис.1).

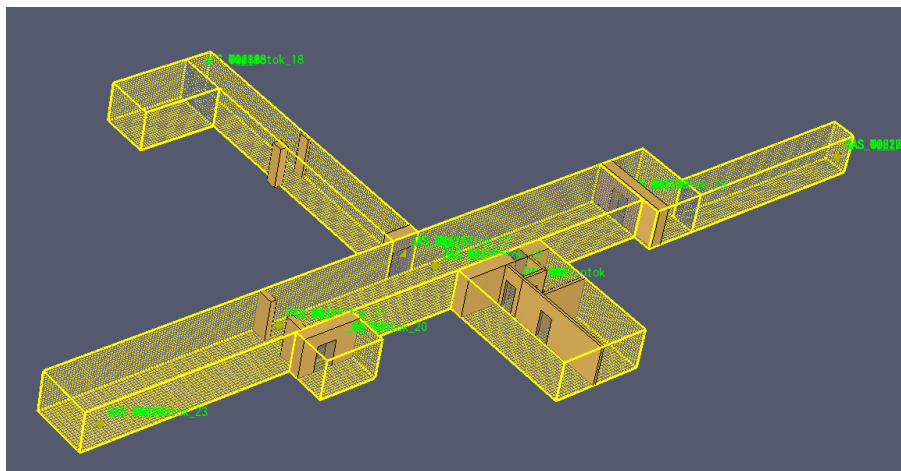


Рисунок 1 – Модель будівлі з осередками пожежі.

На кожному поверсі моделювалося по два сценарії пожежі. Основна причина пожежі це коротке замкнення електропроводки та порушення протипожежного режиму. Горіння та небезпечні чинники пожежі поширюються радіально по площі приміщення з осередку пожежі. Методику розрахунку часу евакуації застосовано згідно ДСТУ 8828-2019. Розташування датчиків: біля кожної сходової клітини. В розрахунку була використана стандартна пожежна навантага «Кабінет; меблі+папір (0,75+0,25).» [10]:

- нижня теплота згоряння 14 МДж/кг;
- лінійна швидкість розповсюдження полум'я 0,0042 м/с
- питома масова швидкість вигорання 0,0129 кг/м²с
- димоутворююча здатність 53 Нпм²/кг
- споживання кисню 1,161 кг/кг
- виділення вуглекислого газу 0,642 кг/кг
- виділення чадного газу 0,00317 кг/кг
- виділення хлористого водню 0,00 кг/кг

За результатами проведеного моделювання було отримано розподілення полів видимості та температури в приміщеннях будівлі (рис.2), а також визначено залежність показника видимості(рис.3а) та температури від часу (рис.3б). Отримані дані ілюструють розповсюдження небезпечних чинників пожежі в приміщеннях із складною планувальною схемою. Вони необхідні для раціонального розміщення людей з метою підвищення їхньої безпеки в разі надзвичайної ситуації. Так ми бачимо що перший небезпечний чинник пожежі, який досягає критичного значення, є втрата видимості на 122-й секунді тобто через 2 хвилини, ще через півтори хвилини критичним стає значення теплового потоку. Звідси ми можемо зробити висновок, що у приміщеннях повинен бути зроблений особливий акцент на обладнанні візуальними вказівниками шляхів евакуації, а також це приміщення повинно бути обладнане системою димовилучення. Такі заходи дозволять збільшити необхідний час евакуації ще на 2 хвилини. В сучасних будівлях такі заходи безпеки є очевидними та влаштовуються відповідно до будівельних норм, але у будівлях старого планування, які були збудовані ще на початку минулого сторіччя, складно проводити масштабне перепланування. Таким чином, завдяки математичному моделюванню, ми отримуємо інформацію яким саме заходам безпеки слід приділити особливу увагу.

Як свідчить статистичні дані та практичний досвід найпершими з небезпечних чинників досягають критичних значень видимість та температура. Графіки на рисунку 3 ілюструють настання критичного значення видимості вже на 122 секунді, що в свою чергу менше ніж значення тривалості від початку евакуації для об'єктів громадського призначення [10].

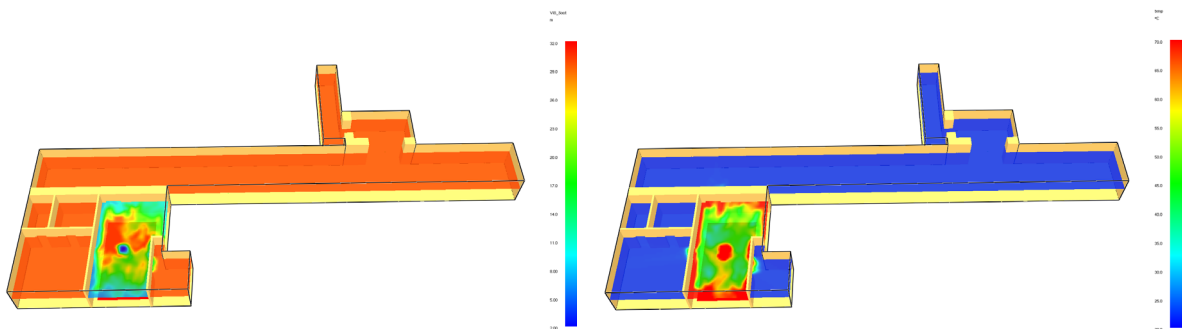


Рисунок 2 – Розподілення полів видимості та температури в приміщеннях.

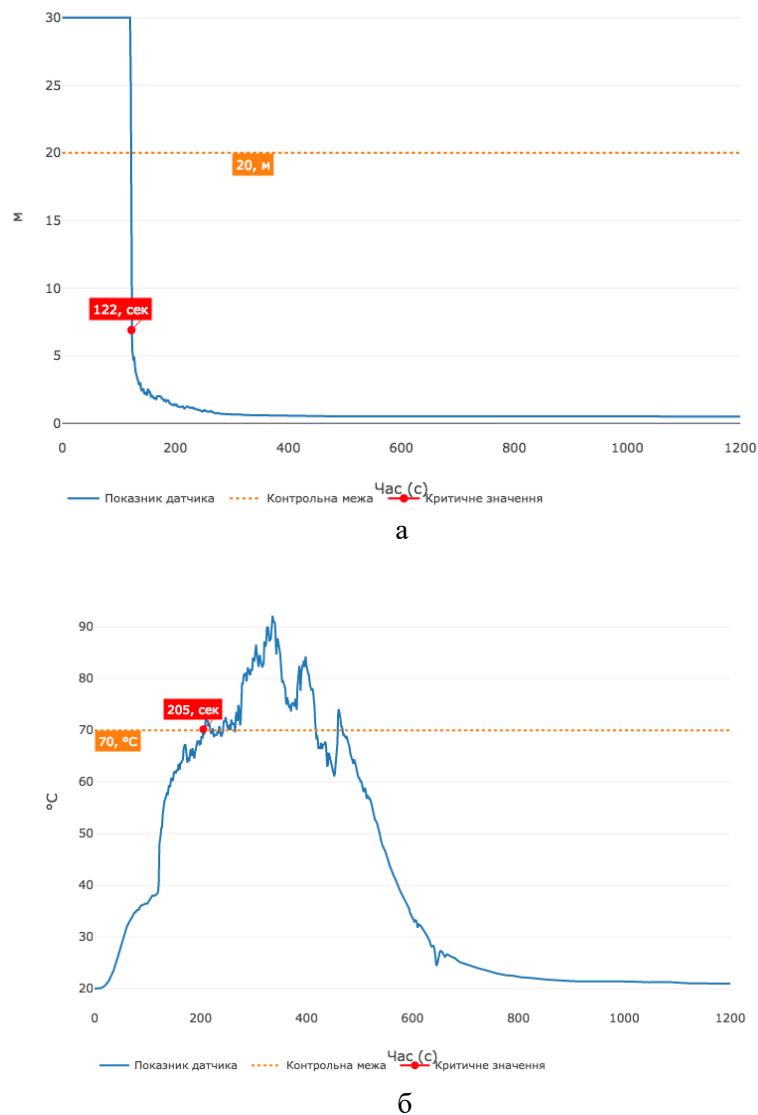


Рисунок 3 – Залежність показника видимості (а) та температури (б) від часу

Після проведення розрахунку необхідного часу евакуації потрібно визначити розрахунковий час евакуації з приміщень будівлі. Розрахунок проводився за спрощеною аналітичною моделлю руху згідно [10]. Розрахунки проводяться для кожного сценарію і на кожному поверсі, враховуючи особливості руху людей (рис.4).

Розбивши весь шлях руху на ділянки і визначивши параметри руху людей на кожній ділянці визначили розрахунковий час евакуації людей для кожного сценарію.

Результати розрахунку небезпечних чинників пожежі та порівняння їх з розрахунковим часом евакуації наводяться в нижче наведених таблицях.

Табличні дані показують нам, що умови безпечної евакуації виконуються. Але деякі показники мають значення дуже близькі до критичних, як, наприклад співвідношення розрахункового та необхідного часу евакуації на деяких ділянках 3-го та 2-го поверхів. Це означає, що під час проведення реконструкції на ці ділянки слід звернути особливу увагу і вжити додаткових заходів, які б змінили співвідношення розрахункових і критичних даних у бік їх більшої різниці.

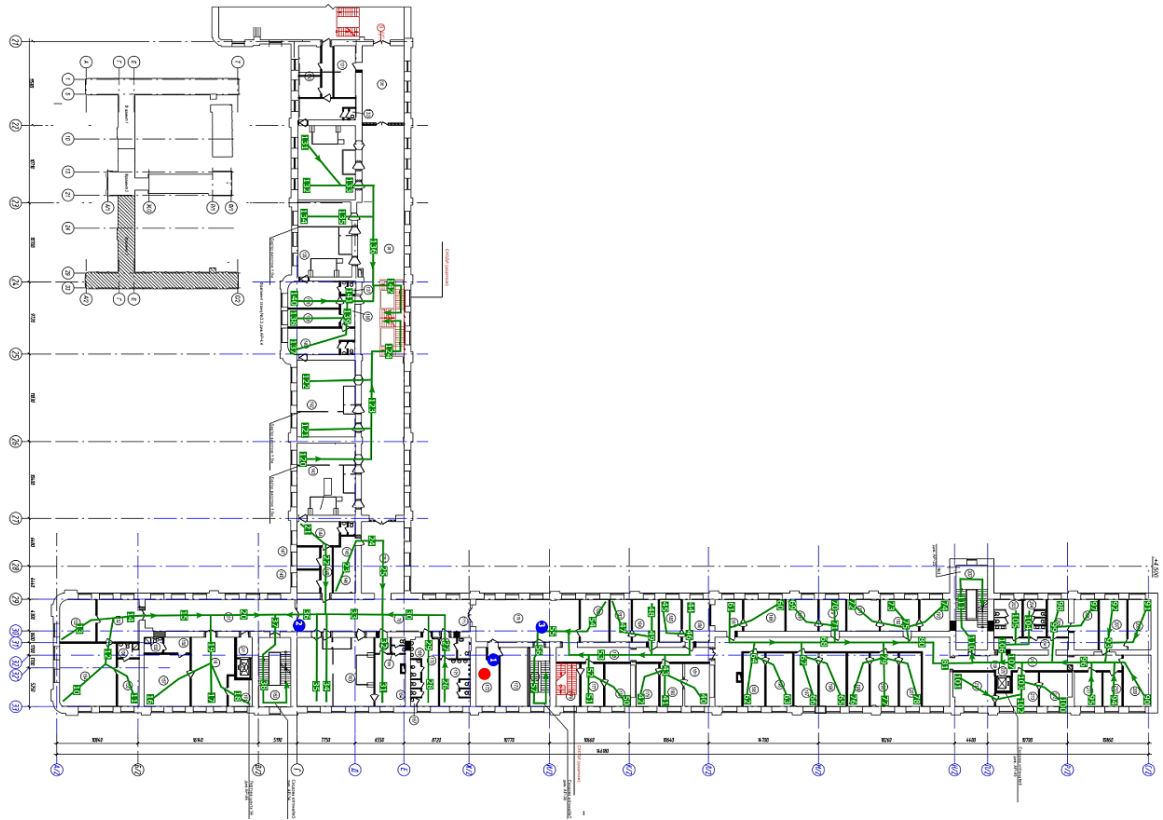


Рисунок 4 – Визначення розрахункового часу евакуації людей.

Таблиця 1 – Результати розрахунку необхідного часу евакуації з 3-го поверху

Сценарій пожежі/ датчики	Час досягнення небезпечного чиннику пожежі*						
	Вміст CO	Вміст CO ₂	Вміст HCl	Знижений вміст O ₂	Підвищена температура	Втрата видимості	Тепловий потік
Датчик 1	-	-	-	-	38,92	34,75	20,46
Датчик 2	-	-	-	-	205	122	363

Розрахунковий час евакуації (датчик 2): 112,2 с**.

Були враховані показники ділянок 11,12,16,22,23,26.

Розрахунковий час 112,2 с < Необхідний час 122 с.

Умова безпечної евакуації з 3-го поверху виконується.

Таблиця 2 – Результати розрахунку необхідного часу евакуації з 2-го поверху

Сценарій пожежі/ датчики	Час досягнення небезпечного чиннику пожежі*						
	Вміст CO	Вміст CO ₂	Вміст HCl	Знижений вміст O ₂	Підвищена температура	Втрата видимості	Тепловий потік
Датчик 1	-	-	76,14	-	76,14	54,99	164,97
Датчик 2	-	-	293,28	-	495,12	246,75	-
Датчик 3	-	-	167,79	-	198,81	129,31	913,68

Розрахунковий час евакуації до сходової клітини №162 (датчик 2): 121,1 с**.

Були враховані показники ділянок 23,24,25,33,36,37.

Розрахунковий час 121,1 с < Необхідний час 246,75 с.

Умова безпечної евакуації з 2-го поверху виконується.

Розрахунковий час евакуації до сходової клітини №174 (датчик 3): 121,1 с**.
 Були враховані показники ділянок 40,43,53,55,56.
 Розрахунковий час 121,1 с < Необхідний час 129,31 с.
 Умова безпечної евакуації з 2-го поверху виконується.

Таблиця 3 – Результати розрахунку необхідного часу евакуації з 1-го поверху

Сценарій пожежі/ датчики	Час досягнення небезпечного чиннику пожежі*						
	Вміст CO	Вміст CO ₂	Вміст HCl	Занижений вміст O ₂	Підвищена температура	Втрата видимості	Тепловий потік
Датчик 1	-	-	175,82	-	201,78	96,76	738
Датчик 2	-	-	299,72	-	490	202,96	-
Датчик 3	-	-	481,44	-	-	361,08	913,68

Розрахунковий час евакуації до сходової клітини №120 (датчик 2): 102 с**.
 Були враховані показники ділянок 10,11,15,17,18,22,35.
 Розрахунковий час 102 с < Необхідний час 202,96 с.
 Умова безпечної евакуації з 1-го поверху виконується.

Розрахунковий час евакуації до сходової клітини №106 (датчик 3): 113,4 с**.
 Були враховані показники ділянок 51,53,60,61.
 Розрахунковий час 113,4 с < Необхідний час 361,08 с.
 Умова безпечної евакуації з 1-го поверху виконується.

Таблиця 4 – Результати розрахунку необхідного часу евакуації з цокольного поверху

Сценарій пожежі/ датчики	Час досягнення небезпечного чиннику пожежі*						
	Вміст CO	Вміст CO ₂	Вміст HCl	Занижений вміст O ₂	Підвищена температура	Втрата видимості	Тепловий потік
Датчик 1	109	511	-	104	91	68	-
Датчик 2	172	354	-	262	141	127	414
Датчик 3	250	448	-	433	370	234	-

Розрахунковий час евакуації до сходової клітини №4 (датчик 2): 46 с**.
 Були враховані показники ділянок 10,11,13,14,15.
 Розрахунковий час 46 с < Необхідний час 127 с.
 Умова безпечної евакуації з цокольного поверху виконується.

Розрахунковий час евакуації до сходової клітини №8 (датчик 3): 53 с**.
 Були враховані показники ділянок 21,22,23,25.
 Розрахунковий час 53 с < Необхідний час 234 с.
 Умова безпечної евакуації з цокольного поверху виконується.

Таблиця 5 – Результати розрахунку необхідного часу евакуації з цокольного поверху (сценарій 2)

Сценарій пожежі/ датчики	Час досягнення небезпечного чиннику пожежі*						
	Вміст CO	Вміст CO ₂	Вміст HCl	Занижений вміст O ₂	Підвищена температура	Втрата видимості	Тепловий потік
Датчик 1	157	-	95	168	129	73	252
Датчик 2	217	-	167	313	243	152	-

Розрахунковий час евакуації до сходової клітини №57 (датчик 2): 57 с**.

Були враховані показники ділянок 62,63,65,67.

Розрахунковий час 57 с < Необхідний час 152 с.

Умова безпечної евакуації з цокольного поверху виконується.

* вказується час (в секундах) настання конкретного небезпечного чиннику пожежі від початку загоряння

** врахований час початку евакуації +0,5 хвилини, відповідно до [10]

Маломобільні групи населення. Відповідно до [11] місця обслуговування і (або) постійного перебування МГН повинні розташовуватися на мінімально можливих відстанях від евакуаційних виходів із приміщень, з поверхів і з будинків назовні. У даному проекті ця норма виконується.

Відповідно до ДБН В.2.2-40:2018 Інклюзивність будівель і споруд. Основні положення(додаток Б)[11] щільність людського потоку на маршрутах евакуації маломобільних груп населення до ліфтів на 3, 2 та 1 поверхах не досягає значення, яке впливає на швидкість руху людей у потоці.

Таким чином для визначення часу руху відвідувачів з малою мобільністю було використане табличне найнижче значення швидкості пересування для категорії М2 «Немічні люди, інваліди на протезах, інваліди з вадами зору». Для цієї категорії швидкість дорівнює 30 м/хв. Враховуючи довжину шляху по облаштованим коридорам кожного поверху 26.98 м, час руху рівний 1.4 хв з урахуванням часу початку евакуації. Отриманий час є меншим за необхідний та дозволяє евакуюватись до тамбуру ліфта, за допомогою якого

Висновки. За результатами математичного моделювання негативного впливу небезпечних чинників пожежі та визначення розрахункового часу евакуації людей з приміщення Касаційного цивільного суду, робиться висновок, що об'ємно-планувальні рішення цього закладу дозволяють провести безпечну евакуацію людей у разі пожежі. Проте деякі показники мають значення дуже близькі до критичних. Це означає, що під час проведення реконструкції на ці ділянки слід звернути особливу увагу і вжити додаткових заходів, які б змінили співвідношення розрахункових і критичних даних у бік їх більшої різниці.

На основі отриманих даних доцільно розробити рекомендації щодо оптимального розміщення людей в приміщеннях будівель, що належать до культурної спадщини.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що вперше для умов саме таких параметрів об'ємно-планувальних рішень будівлі було визначено необхідний та розрахунковий час евакуації людей з приміщень.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання принципів та підходів, що викладено в роботі, для подібних об'єктів культурної спадщини для визначення часу безпечної евакуації, що дозволить підвищити безпеку відвідувачів та персоналу під час виникнення надзвичайної ситуації. У такого типу приміщеннях повинен бути зроблений особливий акцент на обладнанні візуальними вказівниками шляхів евакуації.

Список літератури

1. 7 історичних будівель у Києві, які горіли за останні 5 років [Електронне джерело] <https://bzh.life/ua/gorod/7-istoricheskikh-zdaniy-v-kieve-kotorye-goreli-za-poslednie-5-let/>
2. ДСТУ-Н Б В.3.2-4:2016 Настанова щодо виконання ремонтно-реставраційних робіт на пам'ятках архітектури та містобудування. [Електронне джерело] http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=65005.
3. Тесленко, О. М., Цимбалістий, С. З., Кравченко, Н. В., Доценко, О. Г., Крикун, О. М. (2019). Аналіз існуючих програмних комплексів для розрахунку часу евакуації людей під час пожежі. Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека, (1), 33-39.

4. Ronchi, E. (2021). Developing and validating evacuation models for fire safety engineering. *Fire Safety Journal*, Vol. 120: 103020. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103020>.
5. Данілін, О. М., Комяк, В. М., Дворецька, Т. О. (2019). Алгоритм моделювання індивідуально-потокowego руху людей при евакуації в умовах пожежі та його характеристики. *Проблеми надзвичайних ситуацій*, (29 (1)), 29-36.
6. Sano, T., Ronchi, E., Minegishi, Y., Nilsson, D. (2018). Modelling pedestrian merging in stair evacuation in multi-purpose buildings. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 85: 80-94. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.04.003>.
7. Kostenko, V., Gamiy, Y., Kostenko, T., Tsvirkun, S., Udovenko, M. (2021). Dynamics of motion of gases from a source of spontaneous combustion of coal in mine workings. *Rudarsko-geološko-NaftniZbornik*, n36(2): 109–117. <https://doi.org/10.17794/rgn.2021.2.10>.
8. Вовк С., Ференц Н. (2020). Протипожежний захист культових споруд в Україні. *Zeszyty Naukowe sgsp 2020, Nr 75/3/2020*. 39-49. DOI: 10.5604/01.3001.0014.4267.
9. Fire Dynamics Simulator – User’s Manual. [Електронне джерело] <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir6469.pdf>.
10. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. [Електронне джерело] http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82138.
11. ДБН В.2.2-40:2018 Інклюзивність будівель і споруд. Основні положення. [Електронне джерело] http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79740.

References

1. 7 historical buildings in Kyiv that burned in the last 5 years [7 istorichnykh budivel' u Kyievi, yakihorily za ostanni 5 rokiv] [Electronic source] <https://bzh.life/ua/gorod/7-istoricheskikh-zdaniy-v-kieve-kotorye-goreli-za-poslednie-5-let/> (in Ukrainian).
2. DSTU-N B V.3.2-4:2016 Guidelines on the execution of repair and restoration works on monuments of architecture and urban planning. [Nastanova shchodo vykonannya remontno-restavratsiynykh robot na pam'yatkakh arkhitektury ta mistobuduvannya] [Electronic source] http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=65005 (in Ukrainian).
3. Teslenko, O. M., Tsimbalisty, S. Z., Kravchenko, N. V., Dotsenko, O. G., Krykun, O. M. (2019). Analysis of existing software complexes for calculating the time of evacuation of people during a fire. [Analiz isnuuyuchykh prohramnykh kompleksiv dlya rozrakhunku chasu evakuatsiyi lyudey pid chas pozhezhi] *Scientific bulletin: civil protection and fire safety*, (1), 33-39 (in Ukrainian).
4. Ronchi, E. (2021). Developing and validating evacuation models for fire safety engineering. *Fire Safety Journal*, Vol. 120: 103020. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103020>.
5. Danilin, O. M., Komyak, V. M., Dvoretzka, T. O. (2019). Algorithm for modeling the individual flow movement of people during evacuation in fire conditions and its characteristics. [Alhorytm modelyuvannya indyvidual'no-potokovoho rukhu lyudey pry evakuatsiyi v umovakh pozhezhi ta yoho kharakterystyky] *Problems of emergency situations*, (29 (1)), 29-36 (in Ukrainian).
6. Sano, T., Ronchi, E., Minegishi, Y., Nilsson, D. (2018). Modelling pedestrian merging in stair evacuation in multi-purpose buildings. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 85: 80-94. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.04.003>.
7. Kostenko, V., Gamiy, Y., Kostenko, T., Tsvirkun, S., Udovenko, M. (2021). Dynamics of motion of gases from a source of spontaneous combustion of coal in mine workings. *Rudarsko-geološko-NaftniZbornik*, n36(2): 109–117. <https://doi.org/10.17794/rgn.2021.2.10>.
8. Vovk S., Ferenc N. (2020). Fire protection of religious buildings in Ukraine. [Protypozhezhnyy zakhyst kul'tovykh sporud v Ukrayini] *Zeszyty Naukowe sgsp 2020, Nr 75/3/2020*. 39-49. DOI: 10.5604/01.3001.0014.4267 (in Ukrainian).
9. Fire Dynamics Simulator – User’s Manual. [Електронне джерело] <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir6469.pdf>.
10. DSTU 8828:2019 Fire safety. Terms. [Pozhezha bezpeka. Zahal'ni polozhennya.] [Electronic source] http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82138 (in Ukrainian).
11. DBN V.2.2-40:2018 Inclusiveness of buildings and structures. Substantive provisions. [Inklyuzyvnist' budivel' i sporud. Osnovni polozhennya.] [Electronic source] http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79740 (in Ukrainian).

Надійшла до редакції 04.10.2022

S. Tsvirkun, T. Kostenko, M. Udovenko

ENSURING THE PROTECTION OF PEOPLE FROM EMERGENCIES RELATED TO FIRES IN BUILDINGS BELONGING TO CULTURAL HERITAGE OBJECTS

Purpose. Ensuring the protection of people from emergency situations related to fires in buildings belonging to cultural heritage sites by means of mathematical modeling of dynamic processes and phenomena characteristic of fire.

Methods. The FDS software complex, which numerically solves the Navier-Stokes equation for low-speed temperature-dependent flows, was used to determine the dangerous factors of fire. An analytical model of the movement of people during a fire was used to calculate the evacuation time.

Results. Based on the results of the simulation, the values of fire hazard factors in the volume of the building have been calculated, and the dependence of the indicators on time has also been determined. The obtained data illustrate the spread of dangerous fire factors in premises with a complex planning scheme. They are necessary for the rational placement of people in order to increase their safety in the event of an emergency. Due to mathematical modeling, we get information about which security measures should be given special attention.

Scientific novelty of the obtained results lies in the fact that for the conditions of precisely such parameters of the volume-planning decisions of the building, the time of the onset of the critical value of dangerous fire factors and the time of evacuation of people from the premises have been determined.

Practical significance of the obtained results lies in the possibility of using the principles and approaches presented in the work for similar cultural heritage sites to determine the necessary evacuation time, which allows increasing the safety of visitors and staff during an emergency situation. In this type of premises, special emphasis should be placed on equipping with visual indicators of evacuation routes.

Keywords: dangerous factors of fire, modeling, evacuation, estimated time.

Відомості про авторів

Цвіркун Сергій Вікторович – кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри організації заходів цивільного захисту Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України (вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, Україна), <https://orcid.org/0000-0002-1807-9330>; tsvirkun80@ukr.net

Костенко Тетяна Вікторівна – доктор технічних наук, професор, заступник начальника кафедри безпеки об'єктів будівництва та охорони праці Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України (вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, Україна), <https://orcid.org/0000-0001-9426-8320>; tatiana.kostenko@gmail.com

Удовенко Максим Юрійович – старший науковий співробітник відділу організації наукової діяльності Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України (вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, Україна), <https://orcid.org/0000-0002-4143-8645>; max.udovenko@gmail.com

Tsvirkun Serhii – PhD, Associate Professor, Head of the Department of organization of civil protection measures, Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Defense of Ukraine, Cherkasy, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-1807-9330>; tsvirkun80@ukr.net

Kostenko Tetiana - Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of the Department of construction objects safety and labor protection, Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Defense of Ukraine, Cherkasy, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0001-9426-8320>; tatiana.kostenko@gmail.com

Udovenko Maksym - Senior Researcher of the Department of Organization of Scientific Activity, Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Defense of Ukraine, Cherkasy, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-4143-8645>; max.udovenko@gmail.com