

## УДК 614.8

*С. М. Шахов, PhD, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-9161-1696)*

*С. А. Виноградов, к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0003-2569-5489)*

*Є. О. Рибка, д.т.н., професор, заст. нач. центру – нач. відділу (ORCID 0000-0002-5396-5151)*

*С. В. Гарбуз, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-6345-6214)*

*К. М. Остапов, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-1275-741X)*

*Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*

## ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ЕВАКУАЦІЇ ЛЮДЕЙ З БУДІВЕЛЬ ПРИ ПОЖЕЖІ

Об'єктом дослідження є безпечний час евакуації людей при пожежі з типового закладу середньої освіти. Вирішувалась проблема, що полягала у невідповідності кількісної оцінки «часу до початку евакуації» викладеної у ДСТУ 8828:2019, що регулюється вимогами ДБН В.2.5-56:2014, умовам сьогодення, при визначенні безпечного часу евакуації з будівель та споруд. Завдяки отриманим результатам виявлено особливості, що повноцінно визначають залежність взаємозв'язку між часом початку евакуації та системами оповіщення на прикладі типового закладу середньої освіти. Визначено час евакуації згідно з ДСТУ 8828:2019 із урахуванням вимог ДБН В.2.5-56:2014. Загальний час евакуації із будівлі склав 687 с. Визначено час блокування шляхів евакуації та евакуаційних виходів небезпечними чинниками пожежі. Результати зафіксованої температури не перевищили 46 °С, значення густини кисню не зафіксовано нижче, ніж  $\geq 0,226 \text{ кг/м}^3$ , густина чадного газу не більше  $\leq 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$  протягом загального часу евакуації, що задовольняє вимогам пожежної безпеки. Результати зафіксованої видимості перевищують гранично допустимі значення. Таким чином шлях до евакуаційного виходу № 1 використовуючи сходову клітину № 1 відбувається через двері № 7. Рух через ці двері триває протягом 531 с, отже на момент проходження останньої особи через сходову клітину та двері № 7 видимість складає вже  $\leq 6$  м. Отже евакуація через сходову клітину № 1 небезпечна. Окрім того, остання особа проходить через двері евакуаційного виходу № 1 на 550 с, де значення видимості становить  $\leq 9$  м, що теж є перевищенням гранично допустимих значень, відповідно до вимог. Завдяки проведеному дослідженню виявлено, що є доцільним внесення змін щодо забезпечення закладів середньої освіти системам оповіщення іншого типу, або нормування «часу початку евакуації» у методиці.

**Ключові слова:** евакуація, системи оповіщення, небезпечні чинники пожежі, заклади освіти, PathFinder, PyroSim

### 1. Вступ

Належний рівень пожежної безпеки об'єктів досягається шляхом виконання вимог комплексу протипожежного захисту. Одним зі способів протипожежного захисту є забезпечення своєчасної евакуації людей з будівель чи споруд до моменту блокування шляхів евакуації небезпечними чинниками пожежі. Чи забезпечена безпечна евакуація у разі виникнення пожежі може бути перевірено шляхом проведення натурних експериментів або за допомогою комп'ютерного моделювання. Розрахунок часу, необхідного для безпечної евакуації згідно ДСТУ 8828:2019 складається з «часу до початку евакуації», який зумовлено певними чинниками, такими як тип об'єкту, стан людей, наявність систем оповіщення і т.д., та «часом слідування» до безпечної зони, який залежить від категорії мобільності осіб, що евакуюються.

Щодо кількісної оцінки «часу до початку евакуації», що викладена у ДСТУ 8828:2019, слід зауважити, що ключовим чинником початку евакуації є спрацювання системи оповіщення, типи та час спрацювання яких регламентуються ДБН В.2.5-56:2014 та не змінювались з 2014 року. З урахуванням тенденції швидкого розвитку містобудування, а саме будівель складної форми та конфігурації, вказані вимоги потрібно регулярно переглядати.

Аналіз [1] стандартів, таких як PD 7974-6:2004, CFPА-E Guideline № 19:2009 F свідчать, що кількісна оцінка «часу до початку евакуації» має суттєві відмінності від значень, зазначених у методиці ДСТУ 8828:2019. Зокрема у керівництві з пожежної інженерії (США) [2] та методиці розрахунку евакуації [3] застосовують підхід, який охоплює врахування таких параметрів:

час до початку руху, який складається з часу виявлення, часу оповіщення, часу розпізнавання сигналу оповіщення, та часу відгуку на сигнал оповіщення; розрахунок часу до початку руху враховує такі складові, як тип будівлі, рівні менеджменту, час спрацювання системи оповіщення, та стан людей, що евакуюються з різноманітним варіюванням.

Таким чином, розбіжності у підходах до визначення безпечного часу евакуації людей при пожежі з будівель та споруд з масовим перебуванням людей є актуальною проблемою.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У [4] за допомогою програмного забезпечення на основі BIM і Pathfinder, досліджено евакуацію на прикладі об'єкту охорони здоров'я. Авторами розглянуто два сценарії руху: рух лише сходами; евакуація із використанням пожежних ліфтів. У результаті досліджень виявлено, що без застосування пожежних ліфтів загальний час евакуації становить 1112 с. У разі проведення евакуації із використання пожежних ліфтів загальний час евакуації зменшується до 863 с. Як підсумок автори стверджують, що кількість ліфтів має бути відповідним чином збільшена, відносно до існуючих інженерних рішень. Але авторами не досліджено зв'язок між системами оповіщення та кількісною оцінкою часу до початку евакуації, який полягає в основі розрахунку загального безпечного часу евакуації.

У [5] проведено дослідження щодо моделювання безпечної евакуації з торгового комплексу. Встановлено безпечний інтервал часу, за яким відбувається безпечна евакуація, який складає 1012 с. У результаті автори розділяють загальну криву евакуації на три етапи. Перша стадія становить 0–600 с, що є періодом швидкого зростання, і зв'язок між кількістю евакуйованих і часом має позитивну пропорційність. Швидкість евакуації в цей період висока, і більша частина евакуації завершена, але серйозні затори виникають на деяких виходах протягом 30–480 с цього етапу. Друга стадія: 600–800 с, яку можна описати як період повільного росту, оскільки в цей час швидкість евакуації почала значно зменшуватися. Третя стадія – після 800 с. Швидкість евакуації зростає повільно порівняно з попередньою, і значно знижується у частині евакуаційних сходів. Слід зауважити, що автори не висвітлюють інтервал часу до початку евакуації або час спрацювання системи оповіщення і початок загального руху людей, і подальший вплив на загальний час евакуації на прикладі цього об'єкту.

Авторами [6] досліджено параметри евакуації з приміщення театру із одночасним моделюванням пожежі. Загальний час евакуації складає 350 с. У результаті моделювання встановлено, що на 180 с вільного розповсюдження пожежі спостерігається зниження видимості близько до критичних значень. Протягом 600 с горіння, настає критична концентрація диму у всьому об'ємі приміщення. Але автори не зазначають, який інтервал спрацювання систем оповіщення, від якого залежить час початку евакуації.

У роботі [7] досліджено рівень пожежної в гуртожитку університету із використанням Pyrosim. Визначено швидкість зміни температури, видимості, висоти диму та теплового потоку. За допомогою Pathfinder досліджено безпечний час евакуації

в умовах горіння обраної пожежної навантаги, який складає 164,8 с. Автори дають рекомендації щодо мінімальної ширини вихідних дверей, яка повинна бути не менше 3 м, а ширина сходів – не менше 1,75 м. Зокрема питання взаємозв'язку початку евакуації із системами оповіщення висвітлено не повному обсязі.

Авторами [8] досліджено час безпечної евакуації на прикладі приміщення будівлі університету. Результати моделювання показують що час перевищення гранично допустимих норм небезпечних чинників пожежі для бібліотеки становить 280 с за шкалою пожежі 4 МВт. Результати моделювання евакуації показують, що час евакуації з приміщення бібліотеки складає 411 с. Зокрема встановлено зв'язок між висотою диму та динамікою зростання небезпечних чинників пожежі. Таким чином автори стверджують, що перевищення гранично допустимих норм спостерігається за зниженням диму до 2 м. Час початку евакуації становить 40 с, що є суперечним з довідниковими даними різних стандартів та кількісних оцінок, що пропонуються для моделювання.

У роботі [9] за допомогою програмного забезпечення PyroSim та Pathfinder досліджено процес евакуації з житлової будівлі в умовах пожежі. Встановлено, що при 400 с, видимість на евакуаційному виході панельної квартири нижче 5 м, а блокування шляхів та евакуаційних виходів відбувається на 360 с. При першому сценарії визначено, що загальний час евакуації склав 398,7 с. При повторному моделюванні із зміною стратегії руху встановлено, що час необхідний для евакуації становить 355,2 с, що відповідає вимогам належного рівня пожежної безпеки об'єкту. Але не зрозуміло, яка кількісна оцінка часу до початку евакуації або час спрацювання системи оповіщення використовувались в зазначеному дослідженні на прикладі цього об'єкту.

Авторами [10] за допомогою Pathfinder проведено дослідження щодо евакуації з виробничого цеху, а для моделювання пожежі використано програмне забезпечення PyroSim. У роботі розглядався час блокування шляхів евакуації небезпечними чинниками пожежі. Також була обрана діюча стратегія евакуації, за використанням якої блокування евакуаційних виходів спостерігалось раніше, ніж остання людина залишала виробничий цех. Як висновок автори пропонують посилити навчання з евакуації людей, переглянути та удосконалити стратегії евакуації. Слід зауважити, що на сьогодні для будівель виробничого призначення не відомі кількісні дані часу початку до евакуації, окрім експериментальних результатів, які слід застосовувати під час моделювання.

Авторами [11] як типове громадське місце, при моделюванні евакуації обрано університетську бібліотеку з великим пожежним навантаженням. Використано програми Revit, Pyrosim і Pathfinder. У результаті встановлено, що час безпечної евакуації становив 739 с. За допомогою управління стратегією евакуації цей час був скорочений до 638 с, що ефективніше на 13,67 %. Автори стверджують, що ефективність евакуації можна значно підвищити за рахунок збільшення вказівок щодо трансляції, додавання знаків, розширення сходів та інших пропозицій щодо оптимізації. Але не зрозуміло, як і чи взагалі використано кількісну оцінку часу до початку евакуації або час спрацювання системи оповіщення, що впливає на достовірність отриманих результатів.

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених визначенню часу евакуації та процесу евакуації людей при пожежі з будівель різного призначення, досі не вирішеним є питання впливу типу системи оповіщення про пожежу, а отже і часу початку евакуації, що встановлені вітчизняними нормативними документами для конкретних типів будівель, на реальний час безпечної евакуації людей при пожежі.

### 3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є виявлення особливостей часу евакуації при пожежі на прикладі закладу середньої освіти.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- визначити час евакуації при пожежі з урахуванням часу спрацювання системи оповіщення;
- визначити час блокування шляхів евакуації небезпечними чинниками пожежі.

### 4. Матеріали та методи дослідження

Об'єкт дослідження – безпечний час евакуації людей при пожежі з типового закладу середньої освіти.

Предмет дослідження – вплив типу системи оповіщення про пожежу та часу початку евакуації на безпечний час евакуації людей при пожежі з типового закладу середньої освіти.

Основна гіпотеза полягає в тому, що час евакуації людей при пожежі, розрахований за вимогами вітчизняних нормативних документів, що враховують час до початку евакуації (ДСТУ 8828:2019) та тип і час спрацювання системи оповіщення (ДБН В.2.5-56:2014), не відповідає реальному часу безпечної евакуації людей та може призвести до їх загибелі через блокування евакуаційних шляхів та виходів небезпечними чинниками пожежі.

Дослідження проводили розрахунковим методом із використанням програми Fire Dynamics Simulator (країна походження США), користуючись інтерфейсом PyroSim (країна походження США) та PathFinder (країна походження США).

## 5. Результати виявлення особливостей часу евакуації при пожежі

### 5.1. Результати визначення часу евакуації з урахуванням часу спрацювання системи оповіщення

Як модель об'єкту обрано типовий заклад середньої освіти з наступними об'ємно-планувальними рішеннями: кількість поверхів – 4; поверхи висотою по 3 м; перекриття між поверхами товщиною 20 см; ширина коридорів 1,8 м; ширина та висота дверей у учбових класах та інших приміщеннях 0,8 та 2 м; дві сходові клітини; три евакуаційні виходи розташовані на першому поверсі; доступ до евакуаційних виходів є тільки через сходові клітини; товщина несучих стін – 40 см; товщина внутрішніх стін – 20 см.

Загальний вигляд створеної моделі та розташування сходових клітини у закладі, через які відбувається евакуація у разі виникнення пожежі наведено на рис. 1.

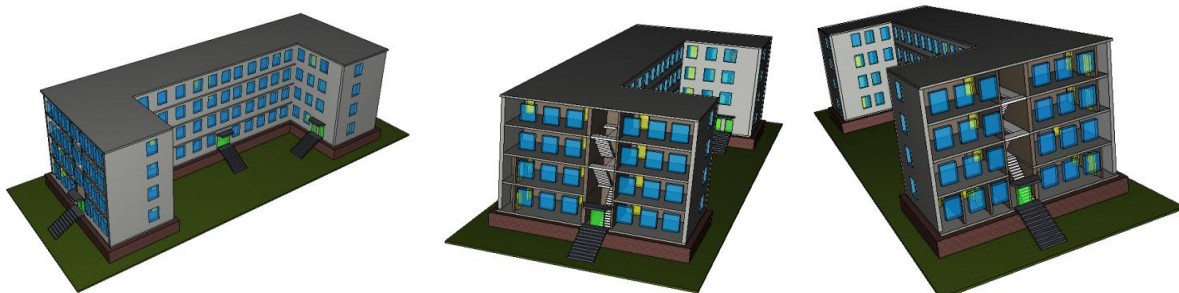


Рис. 1. Загальний вигляд створеної моделі типового закладу середньої освіти

Як вхідні параметри пожежної навантаги та будівельних матеріалів із довідкових джерел (табл. 1, 2) у моделі обрано наступне:

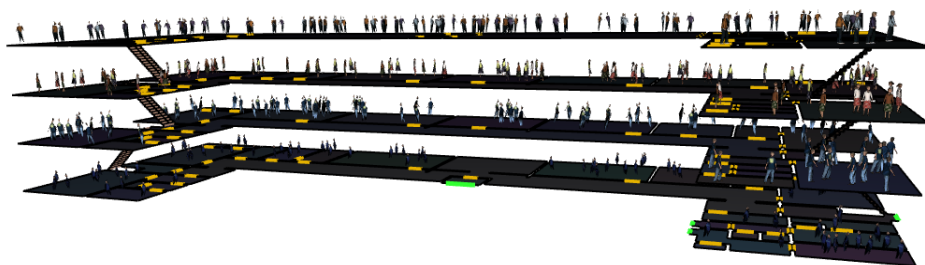
**Табл. 1. Параметри пожежного навантаження приміщення типового закладу середньої освіти [12]**

Характеристика приміщення	Навчальний клас (меблі+папір)
Нижча теплота згорання $Q$ , кДж·кг <sup>-1</sup>	13800
Лінійна швидкість розповсюдження полум'я по поверхні горючого матеріалу $\vartheta$ , м·с <sup>-1</sup>	0,0108
Питома масова швидкість вигорання горючого матеріалу $\Psi_F$ , кг·м <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>	0,0145
Виділення CO <sub>2</sub> $L_{CO_2}$ , кг·кг <sup>-1</sup>	0,203
Виділення CO $L_{CO}$ , кг·кг <sup>-1</sup>	0,0021
Димоутворювальна здатність $D_m$ , Нп·м <sup>-2</sup> ·кг <sup>-1</sup>	270
Споживання кисню $LO_2$ , кг·кг <sup>-1</sup>	1,03

**Табл. 2. Теплофізичні параметри матеріалів стін та стелі [12]**

Цегляні стіни	
Коефіцієнт теплопровідності, кВ/(м·°С)	0,0015
Питома теплоємність, кДж/(кг·°С)	0,96
Густина, кг/м <sup>3</sup>	2645
Ступінь чорноти	0,9
Залізобетонне перекриття	
Коефіцієнт теплопровідності, кВ/(м·°С)	0,00175
Питома теплоємність, кДж/(кг·°С)	1
Густина, кг/м <sup>3</sup>	2200
Ступінь чорноти	0,94

Розміщення осіб у навчальних класах та інших приміщеннях у типовому закладі середньої освіти подано на рис. 2.

**Рис. 2. Розміщення осіб у навчальних класах та інших приміщеннях типового закладу середньої освіти**

Кількість осіб, що беруть участь у евакуації становить 385 з наступними параметрами горизонтальної проекції: учні молодших класів – 0,04 м<sup>2</sup>; учні середніх класів – 0,06 м<sup>2</sup>; учні старших класів – 0,08 м<sup>2</sup>.

Швидкість руху для горизонтального шляху і сходів униз мінімальні 70 м/хв, а для сходів вгору – 62 м/хв.

Відповідно до додатку Б, ДБН В.2.5-56:2014 зазначений заклад середньої освіти повинен бути забезпечений СО III типу.

Навчальний клас, який розташовано на першому поверсі поблизу одного з евакуаційних виходів обрано як місце виникнення пожежі (рис 3, а.). При цьому вважається заблокованим один з евакуаційних виходів, який розташовано на першому поверсі. (рис 3, б)

Початок евакуації у закладі середньої освіти при наявності системи оповіщення I—III типів становить 360 с. Залежність часу евакуації наведені на рис. 4.

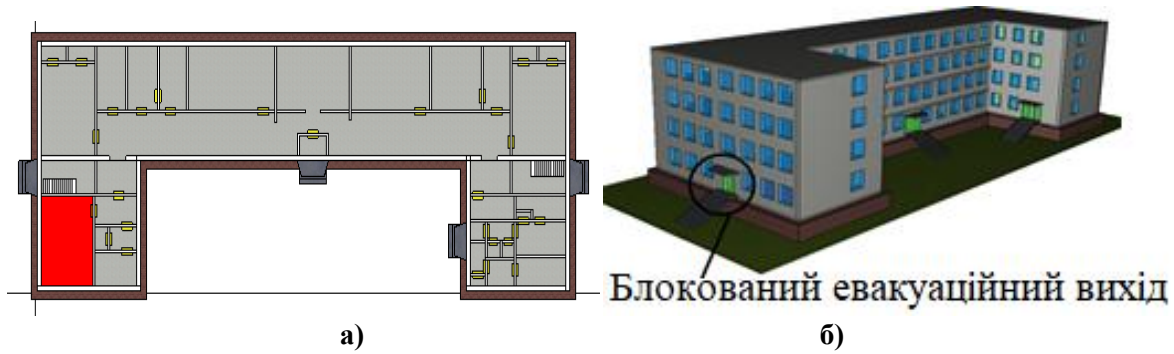


Рис. 3. Параметри евакуації: а – місце виникнення пожежі; б – заблокований евакуаційний вихід

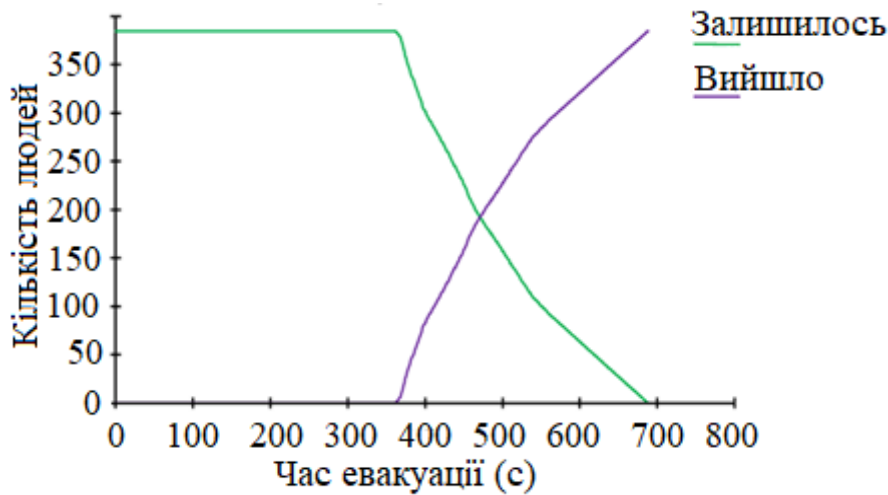


Рис. 4. Загальний час евакуації при наявності СО I—III типів 687 с

Шлях до евакуаційних виходів № 1 та № 2 забезпечений через сходову клітину № 1 та № 2. Під час моделювання рух осіб відбувався усіма доступними шляхами до евакуаційних виходів. Рух через евакуаційний вихід № 2 триває на протязі 687 с. Маршрут руху до евакуаційного виходу № 1 через сходову клітину № 1 відбувається через двері № 7, що розташовані на першому поверсі. Тривалість руху через двері № 7 триває протягом 531 с, що подано на рис. 5. Після цього евакуація через цю сходову клітину не відбувається.

Тривалість руху через евакуаційний вихід № 1 складає 550 с, що подано на рис. 6.

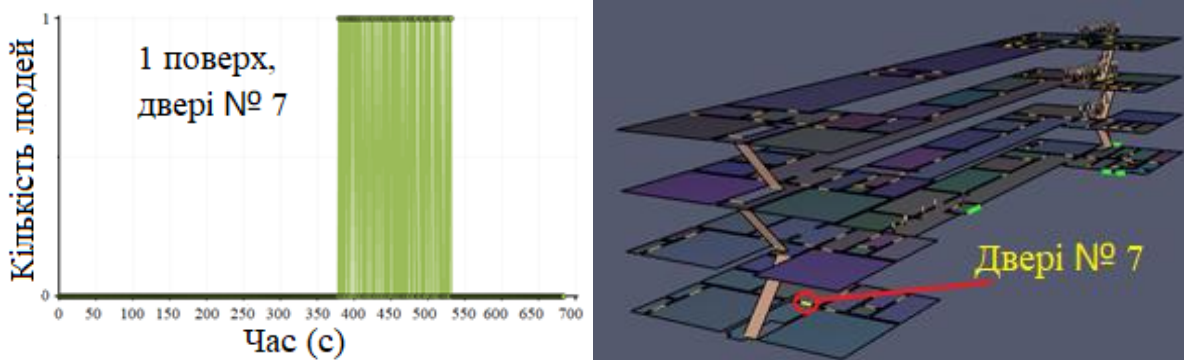


Рис. 5. Час евакуації через двері № 7

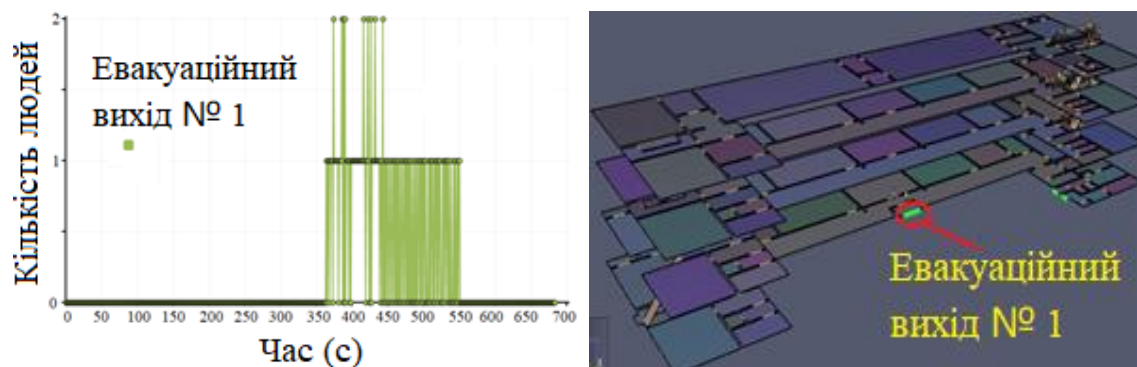


Рис. 6. Час евакуації через евакуаційний вихід № 1

Щодо загального часу евакуації, який становить 687 с, рух решти осіб, які не користувались дверми № 7 та евакуаційним виходом № 1 відбувається через сходову клітину, де евакуаційний вихід вважається не блокованим.

## 5.2. Результати визначення часу блокування шляхів евакуації небезпечними чинниками пожежі

У моделі розвиток швидкості тепловиділення регулювався за рахунок встановленої швидкості розповсюдження полум'я по поверхні горіння у приміщенні. Відповідну залежність швидкості тепловиділення та масової швидкості вигорання пожежної навантаги подано на рис. 7.

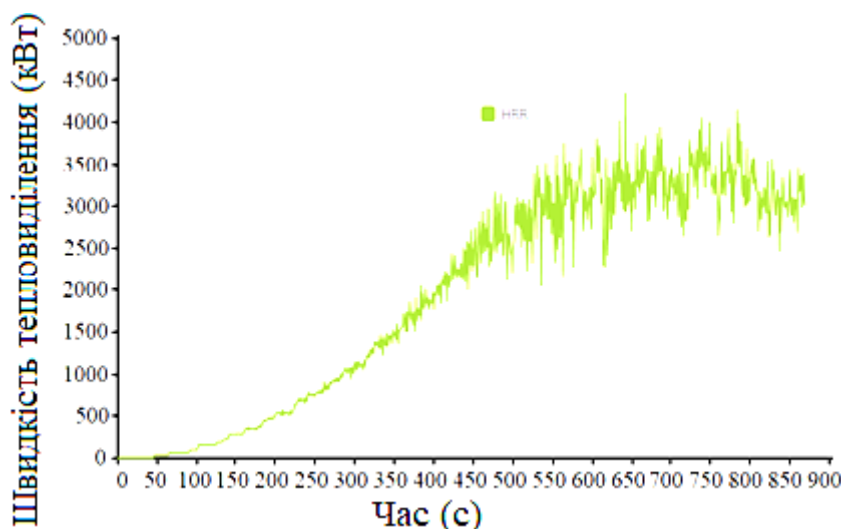


Рис. 7. Промодельоване зростання швидкості тепловиділення у часі

Для визначення часу блокування шляхів евакуації у моделі розташовані датчики вимірювання температури газо-фазного середовища ( $t$ ), видимості ( $VIS$ ), концентрації кисню ( $O_2$ ) та концентрації чадного газу ( $CO$ ). Висота розташування датчиків від підлоги відповідає становить 1,7 м. Загальна кількість – 44 одиниці.

Розміщення датчиків наступне ( $t, VIS, O_2, CO$ ):

- датчики 1–4 – біля входів до сходової клітини що розташована ліворуч, яке веде до заблокованого виходу (сходова клітина № 1);
- датчики 5–8 – біля входів до сходової клітини що розташована праворуч, яка веде до вільного виходу (сходова клітина № 2);
- датчик 9 – перший евакуаційний вихід (exit 1);

- датчик 10 – другий евакуаційний вихід (exit 2);
  - датчик 11 – вихід з приміщення, де відбувається пожежа (fire).
- Відповідне розташування датчиків на сходових клітинах подано на рис. 8.

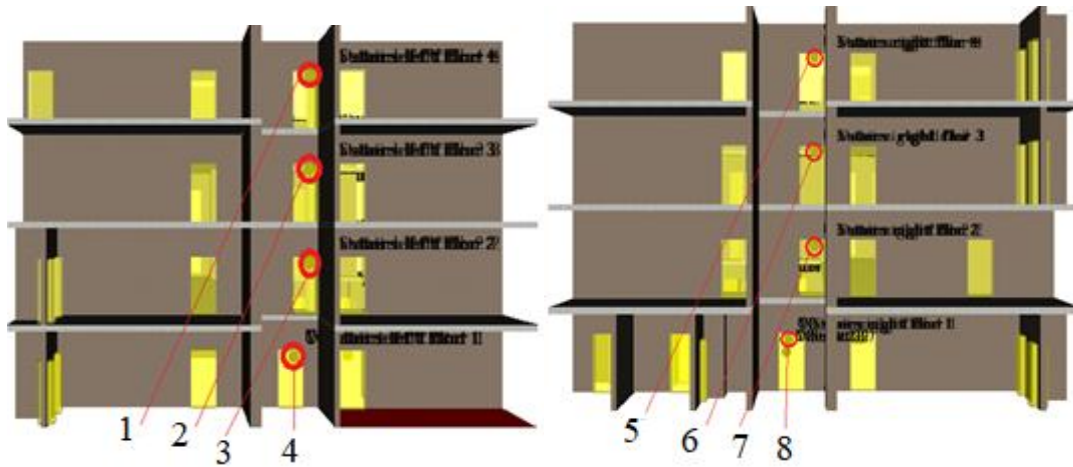


Рис. 8. Розташування датчиків на сходових клітинах

Розташування датчиків біля першого, другого евакуаційного виходу та виходу з приміщення де відбувається пожежа подано на рис. 9.

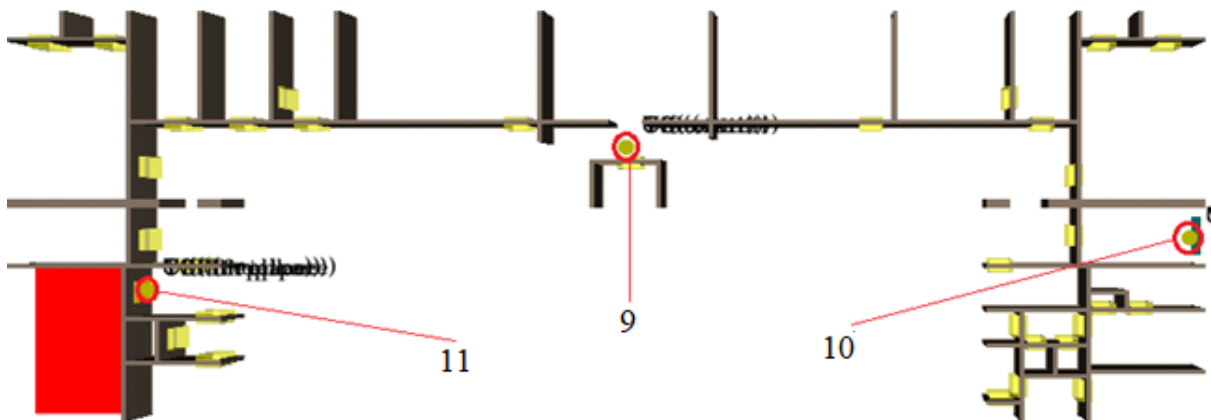


Рис. 9. Розташування датчиків біля першого, другого евакуаційного виходу та виходу з приміщення де відбувається пожежа

Результати моделювання розвитку небезпечних чинників пожежі.

На рис. 10 подано залежність зміни температури ( $t$ ) у часі для кожного з датчиків на відповідному евакуаційному виході, виході з приміщення де відбувається пожежа та на сходових клітинах.

На рис. 11 подано зміну втрати видимості ( $VIS$ ) у часі для кожного з датчиків на відповідному евакуаційному виході, виході з приміщення, де відбувається пожежа та сходових клітинах.

На рис. 12 подано зміну концентрації кисню ( $O_2$ ) у часі для кожного з датчиків на відповідному евакуаційному виході, виході з приміщення, де відбувається пожежа та сходових клітинах.

На рис. 13 подано підвищення концентрації чадного газу ( $CO$ ) у часі для кожного з датчиків на відповідному евакуаційному виході, виході з приміщення, де відбувається пожежа та сходових клітинах.



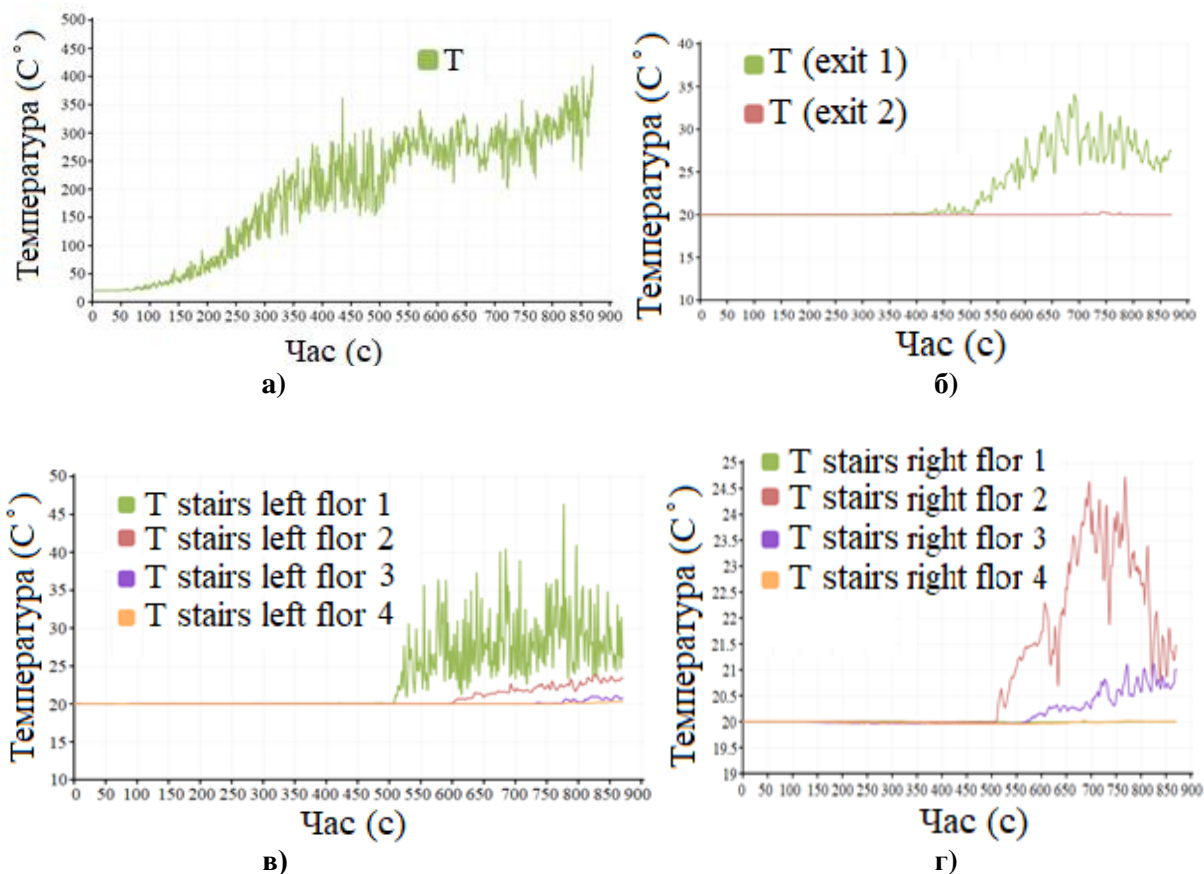


Рис. 10. Зміна температури (t) для кожного з датчиків: а – fire place; б – exit 1, exit 2; в – сходові клітина № 1; г – сходові клітина № 2

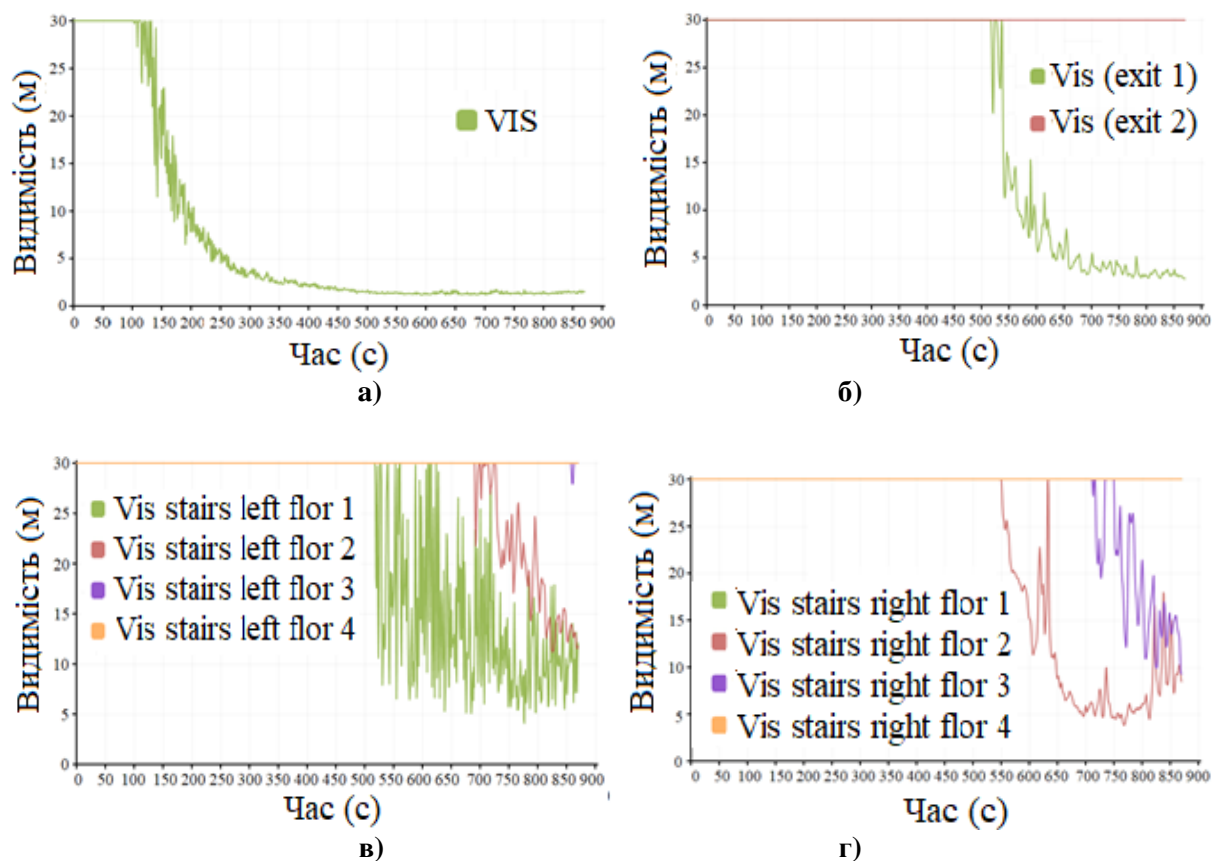


Рис. 11. Зміна видимості (VIS) для кожного з датчиків: а – fire place; б – exit 1, exit 2; в – сходові клітина № 1; г – сходові клітина № 2

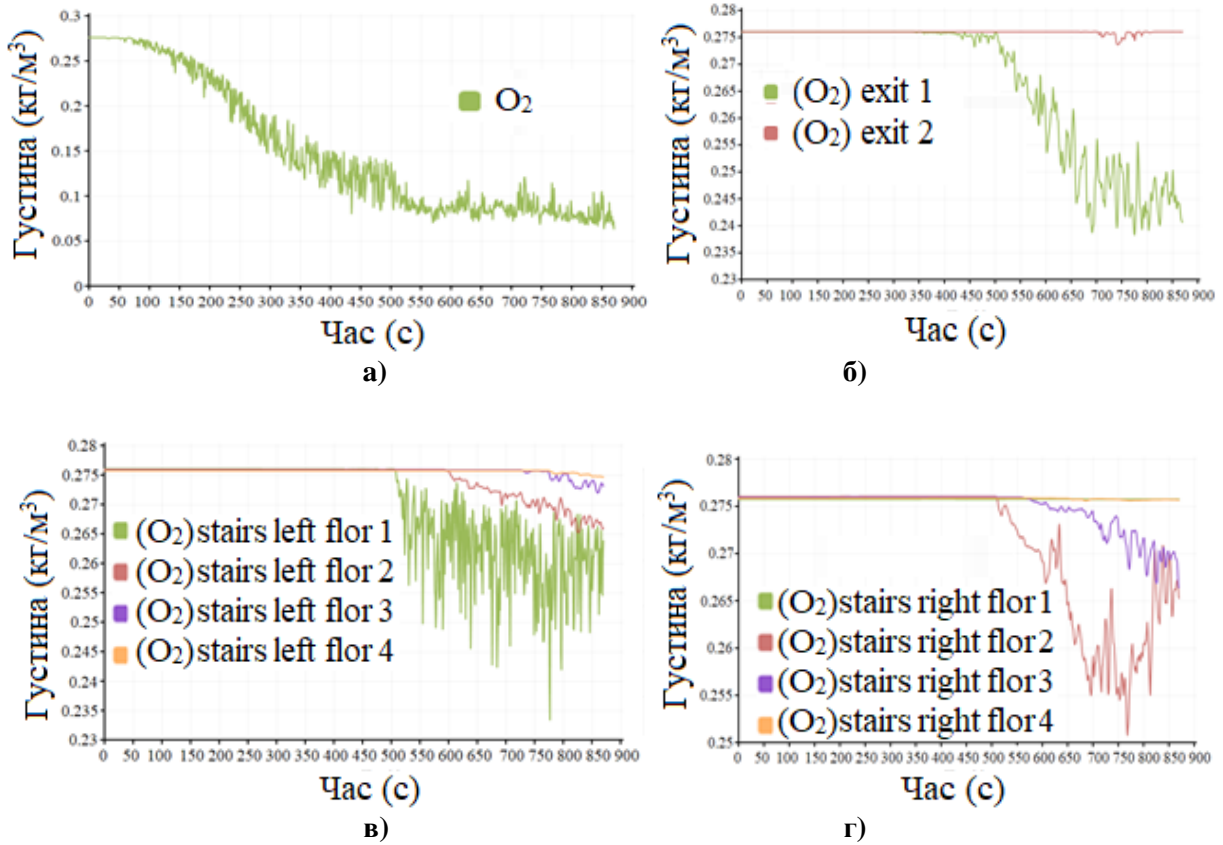


Рис. 12. Зміна густини кисню ( $O_2$ ) для кожного з датчиків: а – fire place; б – exit 1, exit 2; в – сходові клітини № 1; г – сходові клітини № 2

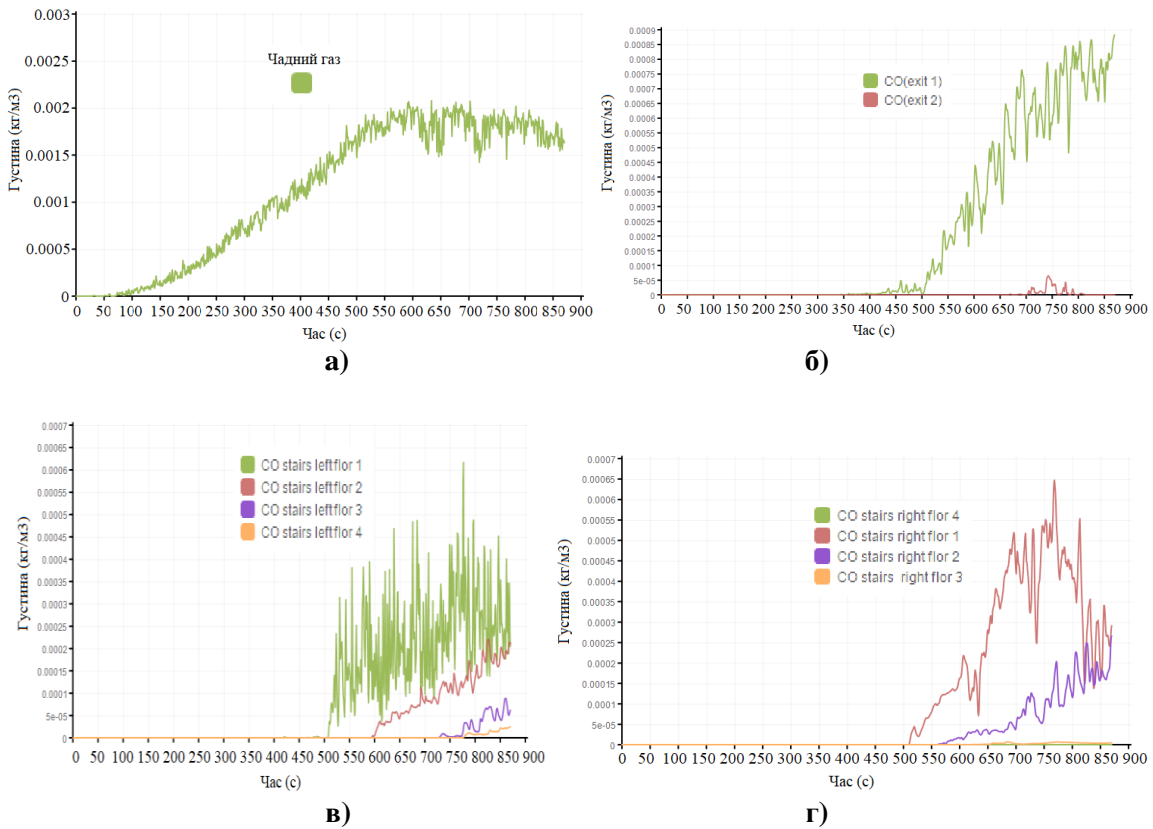


Рис. 13. Зміна густини чадного газу ( $CO$ ) для кожного з датчиків: а – fire place; б – exit 1, exit 2; в – сходові клітини № 1; г – сходові клітини № 2

На рис. 14 подано візуалізацію розповсюдження диму у моделі навчального закладу на протязі 800 с. моделювання з інтервалом 100 с.

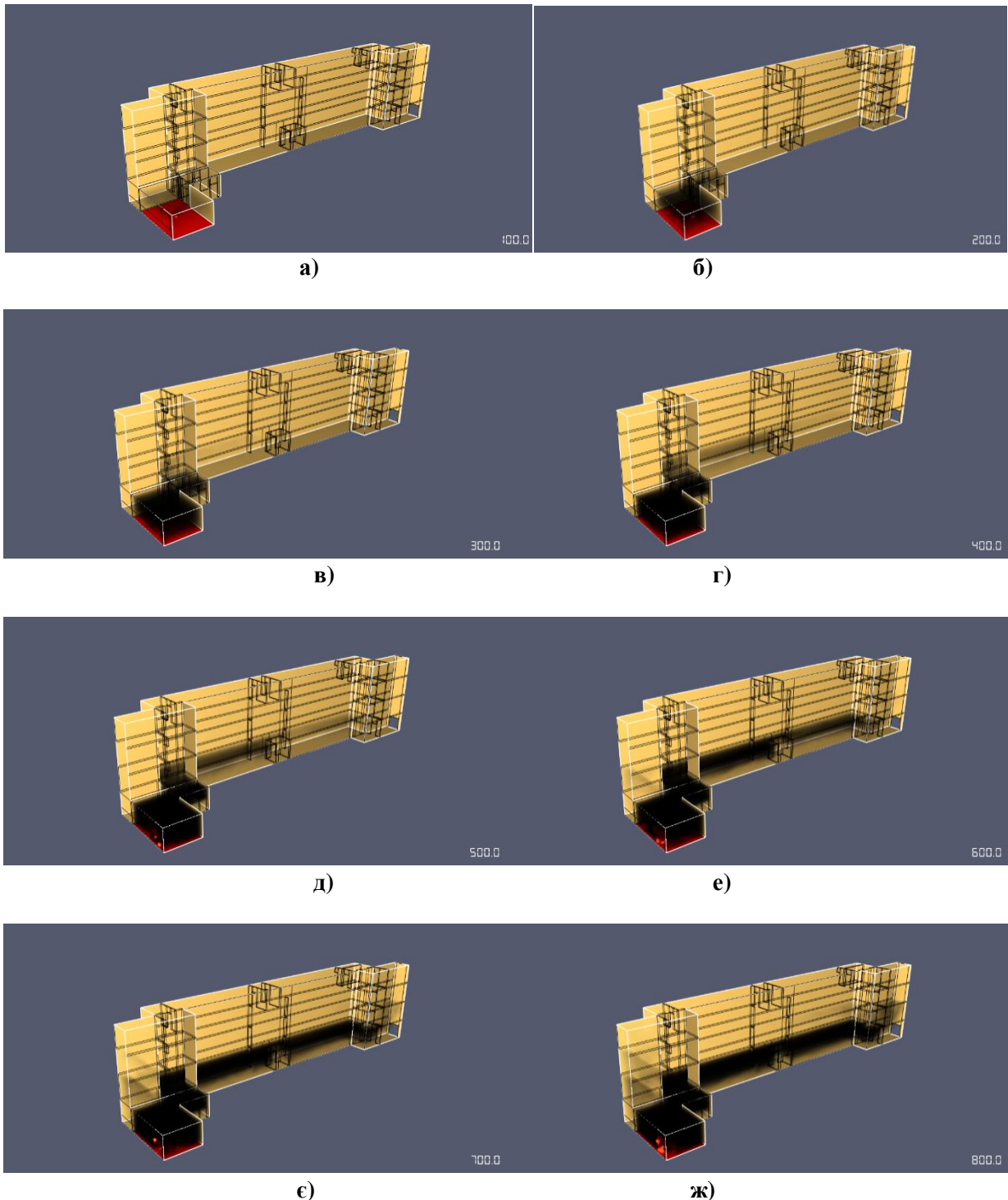


Рис. 14. Візуалізація розповсюдження диму у моделі школи протягом 800 с моделювання: а – 100 с; б – 200 с; в – 300 с; г – 400 с; д – 500 с; е – 600 с; є – 700 с; ж – 800 с

На рис. 15 подано візуалізацію зниження видимості по першому поверху школи на висоті 1,7 м біля евакуаційних виходів № 1 та № 2 протягом часу евакуації.

На рис. 16 подано візуалізацію зниження видимості протягом часу евакуації біля дверей 7, та сходових клітинах, що ведуть до евакуаційних виходів № 1 та № 2.

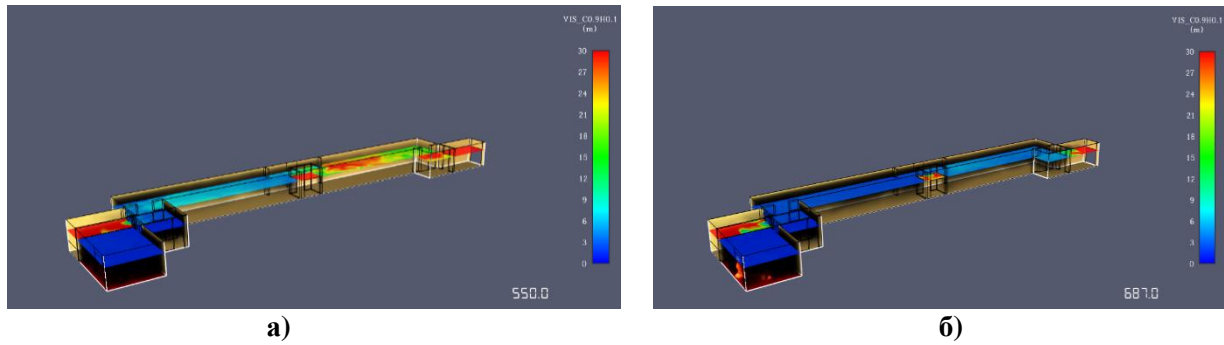


Рис. 15. Візуалізація зниження видимості по першому поверху школи на висоті 1,7 м: а – евакуаційний вихід № 1, 550 с; б – евакуаційний вихід № 2, 687 с

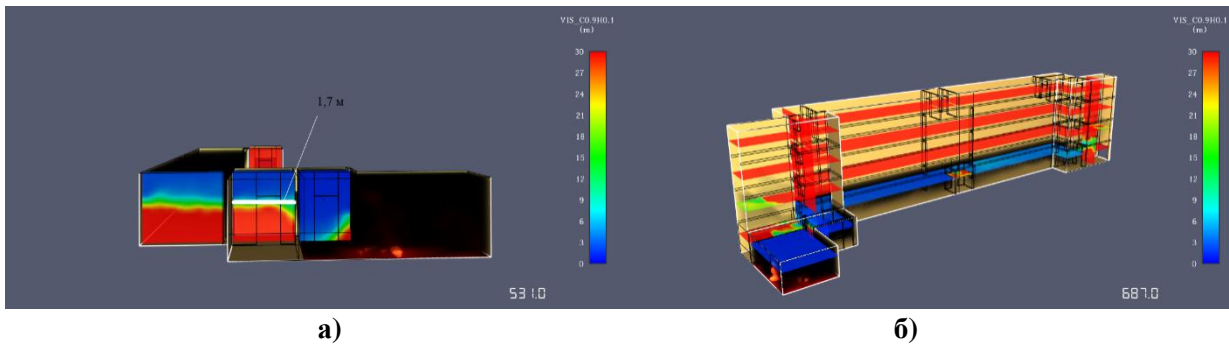


Рис. 16. Візуалізація зниження видимості: а – біля дверей № 7 на першому поверху школи на 531 с на висоті 1,7 м; б – зниження видимості на 2-4 поверсі сходової клітини № 1 та 1-4 поверсі сходової клітини № 2 на 687 с

Зведені результати дослідження, щодо блокування шляхів евакуації небезпечними чинниками пожежі подано у табл. 3.

Табл. 3. Час блокування евакуаційних шляхів та виходів небезпечними чинниками пожежі

Час проходження останньої людини, с.		Час загальної евакуації 687 с			
		Температура, °С	Видимість, м	Густина кисню, кг/м <sup>3</sup>	Густина чадного газу, кг/м <sup>3</sup>
Евакуаційний вихід №1	550	≤35	≤9	≥0,226	≤1,16·10 <sup>-3</sup>
Евакуаційний вихід №2	687	=20	≥20	≥0,226	≤1,16·10 <sup>-3</sup>
Сходової клітини № 1	531	≤46	≤6	≥0,226	≤1,16·10 <sup>-3</sup>
Сходової клітини № 2	687	=25	≥20	≥0,226	≤1,16·10 <sup>-3</sup>

Серед небезпечних чинників пожежі, значення, вище за гранично допустимі норми на протязі періоду евакуації зафіксовано для видимості. Таким чином біля евакуаційного виходу видимість знижується на 55 %, а на шляхах до виходу близько 70 %.

## 6. Обговорення результатів виявлення особливостей часу евакуації при пожежі

Результати, отримані при дослідженні, підтверджують раніше запропоновану гіпотезу. Завдяки отриманим результатам виявлено, що за чинними

ДСТУ 8828:2019 та ДБН В.2.5-56:2014 у частині систем оповіщення і відповідно «часу до початку евакуації» є доцільним внесення змін. А саме забезпечення типових будівель закладів середньої освіти системами оповіщення іншого типу, або нормування «часу до початку евакуації», що запропоновано у ДСТУ 8828:2019. Наприклад, збільшення встановленого значення, оскільки, від цього залежить достовірна оцінка рівня прийняття відповідних рішень для забезпечення належного рівня пожежної безпеки.

Таким чином, щодо критичних значень небезпечних чинників пожежі на шляхах до евакуаційних виходів та безпосередньо біля евакуаційних виходів визначено наступне:

– результати зафіксованої температури не перевищують гранично допустимі значення (рис. 10, табл. 3.) протягом загального часу евакуації, отже блокування евакуаційних виходів, та шляхів, які ведуть до евакуаційних виходів за температурою не відбувається;

– результати зафіксованої густини кисню не перевищують гранично допустимі значення (рис. 12, табл. 3.) протягом загального часу евакуації, отже блокування евакуаційних виходів, та шляхів, які ведуть до евакуаційних виходів за зниженням густини кисню не відбувається;

– результати зафіксованої густини чадного газу не перевищують гранично допустимі значення (рис. 13, табл. 3.) протягом загального часу евакуації, отже блокування евакуаційних виходів, та шляхів, які ведуть до евакуаційних виходів за підвищенням густини чадного газу не відбувається;

– результати зафіксованої видимості перевищують гранично допустимі значення (рис. 11, табл. 3). Шлях до евакуаційного виходу № 1 використовуючи сходову клітину № 1 відбувається через двері № 7. Рух через ці двері триває протягом 531 с. Таким чином на момент проходження останньої особи через сходову клітину та двері № 7 (рис. 5) видимість складає вже  $\leq 6$  м (табл. 3), отже евакуація через сходову клітину № 1 небезпечна. Окрім того, остання особа проходить через двері евакуаційного виходу № 1 на 550 с (рис. 4), де значення видимості становить  $\leq 9$  м (табл. 3), що теж є перевищенням гранично допустимих значень.

Виявленні особливості, відображені у табл. 3 та рис. 4, рис. 5, рис. 11, на відміну від [5–7, 9, 11] повноцінно визначають залежність взаємозв'язку між часом початку евакуації та системами оповіщення та їх загальний вплив на оцінку рівня пожежної безпеки об'єкту на прикладі типового закладу середньої освіти.

Як обмеження проведеного дослідження слід враховувати, що застосувалась однотипна модель будівлі закладу середньої освіти. Доцільно варіювати різноманітні конфігурації будівель та споруд різної форми для розробки кількісної бази, яка задовольняла потребам під час моделювання. Також слід зазначити, що використано одну стратегією евакуації, а саме рух до найближчих виходів найкоротшим шляхом. При варіюванні різних стратегій руху час евакуації може бути знижений.

До недоліків даного дослідження слід віднести знехтування щодо створення окремого профілю кожної особи з індивідуальною реакцією відгуку на сповіщення про тривогу та типом поведінки у разі евакуації. Зазначена індивідуальність кожного профілю також має вплив на загальний час евакуації та є близькою до реальних умов. В перспективі, зазначений недолік може бути усунений шляхом створення матриць індивідуальних профілів, у тому числі з відмінними реакціями відгуку осіб, в залежності від функціонального призначення будівлі.

Розвиток дослідження у подальшому полягає у корегування відповідної методики/нормативних документів стосовно кількісної оцінки «часу до початку евакуації» та вимог обладнання будівель системами оповіщення. Це дозволить ефективно перевіряти та забезпечувати належний рівень пожежної безпеки об'єктів різного функціонального призначення. Серед труднощів, з якими можна зіткнутися, це необхідність проведення багатоповторних дослідів щодо визначення часу евакуації з будівель шляхом натурних експериментів.

## 7. Висновки

1. Визначено час евакуації при пожежі з урахуванням часу спрацювання системи оповіщення з типового закладу середньої освіти шляхом комп'ютерного моделювання. При визначенні враховано існуючі об'ємно-планувальні рішення будівлі, кількість осіб та їх категорії мобільності та площі горизонтальних проєкцій згідно рекомендації ДСТУ 8828:2019. Відповідно ДБН В.2.5-56:2014, заклад середньої освіти забезпечено III типом СО. Враховуючи зазначене «час до початку евакуації» становив 360 с, згідно з ДСТУ 8828:2019. З урахування обраних параметрів, загальний час евакуації із будівлі склав 687 с. При цьому рух останньої людини через шлях до евакуаційного виходу № 1 становив 531 с, а останній момент проходження людини через евакуаційний вихід № 1 становив 550 с.

2. Визначено час блокування шляхів евакуації небезпечними чинниками пожежі. Результати зафіксованої температури не перевищили 46 °С. Значення густини не зафіксовано нижче ніж  $\geq 0,226 \text{ кг/м}^3$ , густина чадного газу не перевищувала значення  $\leq 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ , протягом загального часу евакуації. Отримані значення нижче, ніж гранично допустима норма НЧП за ДСТУ 8829, отже за визначеними НЧП блокування шляхів та евакуаційних виходів не відбувається. Результати зафіксованої видимості перевищують гранично допустимі значення. Таким чином шлях до евакуаційного виходу № 1 використовуючи сходову клітину № 1 відбувається через двері № 7. Рух через ці двері триває протягом 531 с, отже на момент проходження останньої людини через сходову клітину та двері № 7 видимість складає вже  $\leq 6 \text{ м}$ . Отже евакуація учнів через сходову клітину № 1 небезпечна. Окрім того, остання людини проходить через двері евакуаційного виходу № 1 на 550 с, де значення видимості становить  $\leq 9 \text{ м}$  (табл. 3), що теж є перевищення гранично допустимих значень, відповідно до вимог ДСТУ 8829.

Отже запропоновану кількісну оцінку «часу до початку евакуації» для закладів середньої освіти у розглянутій методиці ДСТУ 8828:2019, що відповідає типу системи оповіщення, згідно ДБН В.2.5-56:2014, необхідно переоглядати та корегувати.

## Література

1. Ковалишин В. В., Оношко І. В. Аналіз методології оцінювання пожежних ризиків. Пожежна безпека. 2022. № 41. С. 94–102. doi: 10.32447/20786662.41.2022.11
2. SFPE Guide to Human Behavior in Fire. Springer International Publishing. 2019. doi: 10.1007/978-3-319-94697-9
3. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Springer New York. 2016. doi: 10.1007/978-1-4939-2565-0
4. Hui Z., Hao-cheng L. Simulation of Evacuation in Crowded Places Based on BIM and Pathfinder. J. Phys. 2021. Conf. Ser. 1880 012010. P. 1–10. doi: 10.1088/1742-6596/1880/1/012010

5. Jiuju L., Shuhan L. Pathfinder-Based Simulation and Optimization of Evacuation of Large Commercial Complexes. *Journal of Building Construction and Planning Research*. 2023. Vol. 11(2). P. 27–35. doi: 10.4236/jbcpr.2023.112002

6. Hui Z. Evacuation Simulation of Large Theater Based on Pyrosim and Pathfinder. *J. Phys.* 2022. Conf. Ser. 2289 012017. P. 1–8. doi: 10.1088/1742-6596/2289/1/012017

7. Xinfeng L., Xueqin Z., Bo L. Numerical simulation of dormitory building fire and personnel escape based on Pyrosim and Pathfinder, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*. 2017. Vol. 40(3). P. 257–266. doi: 10.1080/02533839.2017.1300072

8. Ming-xin L., Shun-bing Z., Jing-hong W., Zheng Z. Research on Fire Safety Evacuation in a University Library in Nanjing. *Procedia Engineering*. 2018. Vol. 211. P. 372–378. doi: 10.1016/j.proeng.2017.12.025

9. Mufeng X., Xihua Z., Xinxin P., Yanan W. Simulation of emergency evacuation from construction site of prefabricated buildings. *Scientific Reports*. 2022. 12:2732. P. 1–18. doi: 10.1038/s41598-022-06211-w

10. Liu Q., Zhao D., Yang H. Research on emergency evacuation of workshop based on PyroSim and Pathfinder. *Fire Science and Technology*. 2020. Vol. 39(7). P. 927–930. URL: <https://www.xfkj.com.cn/EN/Y2020/V39/I7/927>

11. Heng H., Zhang S., Zhu J., Zhu Z. Evacuation in Buildings Based on BIM: Taking a Fire in a University Library as an Example. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2022. Vol. 19(3). P. 23–32. doi: 10.3390/ijerph192316254

12. Кошмаров Ю. А. Прогнозування небезпечних чинників пожежі, 2000. 118 с.

*S. Shakhov, PhD, Senior Lecturer of the Department*

*S. Vinogradov, PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department*

*E. Rybka, DSc, Professor, Deputy Head of the Center – Head of Department*

*S. Garbuz, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*

*K. Ostapov, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*

*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

## FEATURES OF DETERMINING THE TIME OF EVACUATION OF PEOPLE FROM BUILDINGS IN CASE OF FIRE

The object of the study is the safe evacuation time of people in case of fire from a typical secondary education institution. The problem was solved, which consisted in the inconsistency of the quantitative assessment of «pre-evacuation time» set out in DSTU 8828:2019, which is regulated by the requirements of DBN B.2.5-56:2014, with today's conditions, when determining the safe time of evacuation from buildings and structures. Thanks to the obtained results, features were revealed that fully determine the dependence of the relationship between the pre-evacuation time and warning systems on the example of a typical secondary education institution. The evacuation time was determined according to DSTU 8828:2019, taking into account the requirements of DBN B.2.5-56:2014. The total evacuation time from the building was 687 s. The time of blocking evacuation routes and evacuation exits by dangerous fire factors is determined. The results of the recorded temperature did not exceed 46 °C, the value of oxygen was not recorded lower than  $\geq 0,226 \text{ kg/m}^3$ , the density of carbon monoxide was not more than  $\leq 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$  during the total evacuation time, which meets the requirements of fire safety. The results of the recorded visibility exceed the maximum permissible values. Thus, the path to evacuation exit № 1 using stairwell № 1 takes place through door № 7. Movement through this door lasts for 531 s, therefore, now when the last person passes through stairwell and door № 7, the visibility is already  $\leq 6 \text{ m}$ . Therefore, evacuation through stairwell № 1 is dangerous. In addition, the last person passes through the door of the evacuation exit № 1 for 550 s, where the visibility value is  $\leq 9 \text{ m}$ , which is also an excess of the maximum permissible values, according to the requirements.

**Keywords:** evacuation, warning systems, fire hazards, educational institutions, PathFinder, PyroSim

**Referense**

1. SFPE Guide to Human Behavior in Fire. (2019). Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-94697-9
2. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. (2016). Springer New York. doi: 10.1007/978-1-4939-2565-0
3. Onoshko, I., Kovalyshyn, V. (2022). Analysis of fire risk assessment methodology. *Fire safety*, 41, 94–102. doi: 10.32447/20786662.41.2022.1112.
4. Hui, Z., Hao-cheng, L. (2021). Simulation of Evacuation in Crowded Places Based on BIM and Pathfinder. *J. Phys. Conf. Ser.*, 1880 012010, 1–10. doi: 10.1088/1742-6596/1880/1/012010
5. Jiuju, L., Shuhan, L. (2023). Pathfinder-Based Simulation and Optimization of Evacuation of Large Commercial Complexes. *Journal of Building Construction and Planning Research*, 11(2), 27–35. doi: 10.4236/jbcpr.2023.112002
6. Hui, Z. (2022). Evacuation Simulation of Large Theater Based on Pyrosim and Pathfinder. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2289 012017, 1–8. doi: 10.1088/1742-6596/2289/1/012017
7. Xinfeng, L., Xueqin, Z., Bo, L. (2017). Numerical simulation of dormitory building fire and personnel escape based on Pyrosim and Pathfinder, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 40(3), 257–266. doi: 10.1080/02533839.2017.1300072
8. Ming-xin, L., Shun-bing, Z., Jing-hong, W., Zheng, Z. (2018). Research on Fire Safety Evacuation in a University Library in Nanjing. *Procedia Engineering*, 211, 372–378. doi: 10.1016/j.proeng.2017.12.025
9. Mufeng, X., Xihua, Z., Xinxin, P., Yanan, W. (2022). Simulation of emergency evacuation from construction site of prefabricated buildings. *Scientific Reports*, 12:2732, 1–18. doi: 10.1038/s41598-022-06211-w
10. Liu, Q., Zhao, D., Yang, H. (2020). Research on emergency evacuation of workshop based on PyroSim and Pathfinder. *Fire Science and Technology*, 39(7), 927–930. Available at: <https://www.xfkj.com.cn/EN/Y2020/V39/I7/927>
11. Heng, H., Zhang, S., Zhu, J., Zhu, Z. (2022). Evacuation in Buildings Based on BIM: Taking a Fire in a University Library as an Example. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 19(3), 23–32. doi: 10.3390/ijerph192316254
12. Koshmarov, U. (2000). Prediction of dangerous factors of fire

Надійшла до редколегії: 19.09.2023

Прийнята до друку: 14.11.2023