

*І. О. Мовчан, канд. техн. наук, Е. М. Гуліда, д-р техн. наук, професор
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

ВИЗНАЧЕННЯ РИЗИКУ ЕВАКУАЦІЇ ЛЮДЕЙ ІЗ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД У ВИПАДКУ ПОЖЕЖІ З УРАХУВАННЯМ ЇЇ КРИТИЧНОГО ЧАСУ

На підставі аналізу основних положень теорії надійності та імовірності були отримані залежності для визначення ризику евакуації людей з громадських і адміністративних споруд та споруд житлового сектора. Отримані залежності дають змогу прогнозувати значення ризику евакуації з урахуванням критичного часу пожежі для забезпечення захисту людей і матеріальних цінностей від пожежі, що є дуже важливим для впровадження різних заходів з метою запобігання виникненню пожежі.

Ключові слова: ризик евакуації, пожежа, критичний час пожежі, інтенсивність відмов.

Сучасний стан проблеми. На сучасному етапі розроблення оптимальних та економічно обґрунтованих протипожежних заходів неможливе без прогнозування динаміки небезпечних факторів пожежі. Їх прогнозування необхідне в першу чергу для організації безпечної евакуації людей з осередку виникнення пожежі, для розроблення та удосконалення систем сигналізації і автоматичного пожежогасіння, для розроблення оперативних планів гасіння пожежі, а також для оцінки вогнестійкості елементів будівельних конструкцій тощо. Розглянемо прогнозування небезпечних факторів пожежі та ризик евакуації людей у випадку виникнення пожежі в громадських та адміністративних спорудах і спорудах житлового сектора.

Небезпечними факторами пожежі, які діють на людей та матеріальні цінності, згідно із [2] є:

- полум'я та іскри;
- підвищена температура навколишнього середовища;
- токсичність продуктів згоряння та термічного розпаду;
- дим;
- понижена концентрація кисню.

В процесі горіння з виділенням теплоти та генерацією токсичних газоподібних продуктів з навколишнього середовища поглинається кисень. Крім цього, утворюється специфічне дисперсне середовище, у якому проходить процес димоутворення. Наведені небезпечні фактори пожежі є параметрами стану середовища, яке заповнює приміщення під час пожежі і залежать від часу вільного горіння, а їх допустиме значення – від критичного часу пожежі.

Критичний час пожежі залежить від досягнення для людини гранично допустимих значень небезпечних факторів пожежі в зоні перебування людей. До цих факторів відносять температуру, яка не повинна перевищувати 70°C , та гранично допустимі значення густини кисню $\text{O}_2 \geq 0,226 \text{ кг/м}^3$; оксиду вуглецю $\text{CO} \leq 0,00116 \text{ кг/м}^3$; вуглекислого газу $\text{CO}_2 \leq 0,11 \text{ кг/м}^3$; та хлористого водню $\text{HCl} \leq 23 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3$ [2]. Крім цього, в процесі пожежі в приміщенні утворюється дим, допустиме значення оптичної густини якого може бути $\mu \leq 1,2 \text{ Нп/м}$, що забезпечує видимість до 2 м, тобто в межах росту людини, яка при переміщенні повинна бачити підлогу.

В технічній літературі розглядалися питання, які стосуються визначенню критичного часу пожежі [1-3, 8], але відсутні дані для прогнозування величини ризику евакуації людей із будівель та споруд у випадку виникнення пожежі з урахуванням її критичного часу. Тому ставиться задача розробити метод прогнозування величини ризику евакуації людей із будівель та споруд з моменту виникнення пожежі.

Мета роботи. Розробити метод прогнозування величини ризику евакуації людей із будівель та споруд у випадку виникнення пожежі з урахуванням її критичного часу.

Постановка задачі та її розв'язання. Задача визначення величини ризику евакуації людей із будівель та споруд у випадку виникнення пожежі складається з таких етапів: 1) визначення критичного часу пожежі; 2) визначення часу евакуації людей; 3) визначення величини ризику евакуації людей.

Алгоритм методу прогнозування величини ризику евакуації людей із будівель та споруд у випадку виникнення пожежі з урахуванням її критичного часу буде таким.

1. Визначення критичного часу пожежі виконується в такій послідовності:

1) за концентрацією кисню, наприклад, для кругової пожежі класу А [1]

$$\tau_{\kappa.O_2} = \left\{ \frac{3c_p \rho_0 T_0 V}{\pi \eta (1-\varphi) Q_{\min} \psi_n v_n^2} \ln \left[\frac{\frac{c_p \rho_0 T_0 L_1}{(1-\varphi) Q_{\min}} + \rho_{01}}{\frac{c_p \rho_0 T_0 L_1}{(1-\varphi) Q_{\min}} + \rho_{1\kappa}} \right] \right\}^{\frac{1}{n}}, \text{ с} \quad (1)$$

де $c_p \approx 10^3 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ – ізобарна теплоємність газового середовища в приміщенні; $\rho_0 \cdot T_0 \approx 3 \cdot 10^2 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{К}$; $\eta \approx 1$ – коефіцієнт повноти згоряння; $\varphi \approx 0,5$ – коефіцієнт тепловтрат; Q_{\min} – найнижча теплота згоряння речовини, яка знаходиться в осередку пожежі, Дж/кг; ψ_n – питома швидкість вигорання, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$; V – вільний об'єм приміщення, м^3 ; v_n – лінійна швидкість розповсюдження полум'я, м/с; L_1 – стехіометричний коефіцієнт, що визначає кількість кисню в кг, яка необхідна для згоряння 1 кг матеріалу, що горить при пожежі; $\rho_{01} = 0,27 \text{ кг/м}^3$ – початкова густина кисню в приміщенні; $\rho_{1\kappa} = 0,226 \text{ кг/м}^3$ – критична густина кисню; $n = 3$ – для кругової пожежі;

2) за концентрацією токсичних газів [1]

$$\tau_{\kappa.m.g} = \left\{ \frac{3c_p \rho_0 T_0 V}{\pi \eta (1-\varphi) Q_{\min} \psi_n v_n^2} \ln \left[\frac{1}{1 - \frac{(1-\varphi) Q_{\min}}{c_p \rho_0 T_0 L_2} \rho_{2\kappa}} \right] \right\}^{\frac{1}{n}}, \text{ с} \quad (2)$$

де L_2 – стехіометричний коефіцієнт, який вказує кількість виділених токсичних газів в кг на 1 кг матеріалу, що горить при пожежі; $\rho_{2\kappa}$ – критична густина відповідного токсичного газу;

3) за димом [3]

$$\mu = \frac{c_p \rho_0 T_0 D}{Q_{\min} \eta (1-\varphi)} \left[1 - \exp \left(- \frac{\psi_n S_{\Pi} \eta Q_{\min} (1-\varphi)}{c_p \rho_0 T_0 V} \tau \right) \right], \text{ Нп}\cdot\text{м}^{-1} \quad (3)$$

де D – питома димовиділення, $\text{Нп}\cdot\text{м}^2/\text{кг}$; $S_{\Pi} = 0,125 \alpha v_n^2 \tau^2$, м^2 – площа кругової та кутової пожежі; α – кут пожежі, рад.

Значення Q_{\min} , ψ_n , L_1 , L_2 , D , $\rho_{2\kappa}$ та v_n наведені в роботі [8].

Для визначення критичного часу пожежі необхідно визначити критичні часи за концентрацією кисню, за концентрацією всіх можливих токсичних газів та визначити критичний час пожежі при $\mu = 1,2 \text{ Нп/м}$. З усіх визначених часів вибрати найменше значення, яке буде відповідати τ_{κ} . Багаточисельні розрахунки для різних об'ємів приміщень показали, що критичний час пожежі коливається в межах $\tau_{\kappa} = 5 \dots 10$ хв. Цей час можна збільшити приблизно в два рази, якщо всі хто перебуває в приміщенні об'єкта будуть забезпечені індивідуальними засобами захисту органів дихання (респіраторами). Крім цього, необхідно враховувати температуру повітря вздовж шляхів евакуації. Результати аналізу температур початкових стадій пожеж в досліджуваних приміщеннях показали, що на відстані 10...18 м від осередку пожежі температура повітря на висоті від підлоги до площини рівних тисків (2...3 м) за 10...15 хв від початку пожежі була меншою за 70°C [8].

2. Визначення часу евакуації τ_e людей з приміщення можна виконати з урахуванням рекомендацій [4]. Для розрахунку приймаємо густину людського потоку при евакуації в приміщенні з використанням горизонтального шляху $q_c = 0,51 \text{ люд./м}^2$, а сходами вниз – $q_c = 0,89 \text{ люд./м}^2$. В споруді загальна кількість N проживаючих або працюючих, з яких, за даними статистики, 40% працюючих завжди розміщується на $(z - 1)$ поверхах громадських або ад-

міністративних споруд та рівномірно проживаючих на $z_{жс}$ поверхах споруд житлового сектора. Максимальна довжина шляху евакуації до першого поверху з громадських або адміністративних споруд дорівнює $(z - 1)l_a$, а із споруд житлового сектора $(z_{жс} - 1)l_a$, де l_a – довжина шляху сходами між суміжними поверхами, значення якого встановлюють при розробленні плану евакуації.

Мінімальна кількість евакуаційних виходів з приміщення будь-якого об'єкта має бути $k = 2$. При розрахунках приймаємо евакуаційний шлях в межах першого поверху l_e найбільшої довжини, як діагональ прямокутної форми першого поверху приміщення об'єкта, тобто

$$l_e = k_{кр} \sqrt{L^2 + B^2}, \text{ м} \quad (4)$$

де $k_{кр} = 1,4$ – коефіцієнт, який враховує кривину шляху евакуації; L – довжина приміщення першого поверху, м; B – ширина приміщення першого поверху, м.

Наступним етапом визначають площу людського потоку при евакуації з поверхів громадської або адміністративної споруд та споруд житлового сектора $S_{л.н.а}$, а також загальну (сумарну) площу людського потоку при евакуації з приміщень першого поверху $S_{л.н.сум}$

$$S_{л.н.а} = k_a N q_e, \text{ м}^2, \quad (5)$$

де $k_a = 0,4$ – для громадських та адміністративних споруд; $k_a = \frac{z_{жс} - 1}{z_{жс}}$ – для споруд житлового сектора;

загальна (сумарна) площа людського потоку при евакуації з приміщень першого поверху

$$S_{л.н.сум} = N q_e, \text{ м}^2. \quad (6)$$

На підставі площ людських потоків визначаємо їх ширину виходячи із довжин шляхів евакуації

для громадських та адміністративних споруд

$$b_a = \frac{S_{л.н.а}}{(z - 1)l_a} \leq 1,5 \text{ м}; \quad (7)$$

для споруд житлового сектора

$$b_a = \frac{S_{л.н.а}}{(z_{жс} - 1)l_a} \leq 1,5; \quad (8)$$

для першого поверху

$$b_e = \frac{S_{л.н.сум}}{l_e} \leq 1,6 \text{ м}, \quad (9)$$

де 1,5 м – ширина маршів сходових кліток приміщення; 1,6 м – найменша ширина проходів та евакуаційних дверей в приміщенні об'єкта.

Враховуючи, що шлях евакуації для громадських та адміністративних споруд дорівнює $L_e = (z - 1)l_a + l_e$, а для споруд житлового сектора $L_e = (z_{жс} - 1)l_a + l_e$, то час тривалості евакуації дорівнюватиме

$$\tau_e = \frac{L_e}{kV_e}, \text{ хв}. \quad (10)$$

де k – кількість евакуаційних виходів; V_e – середня швидкість вільного руху людського потоку, м/хв; згідно із рекомендаціями [4], середня швидкість по горизонтальній поверхні та сходами вниз коливається в межах 66...90 м/хв.

3. Визначення ризику евакуації людей ε_e з осередку пожежі. Значення ризику евакуації людей визначаємо за залежністю [7]

$$\varepsilon_e = \varepsilon_c P_{пр.л} (1 - P_{ев.л}) (1 - R_{без.л}(\tau_k)) \leq [\varepsilon_e], \quad (11)$$

де ε_c – ризик відмови системи *сповіщення*, який визначають за відповідними залежностями; $P_{пр.л}$ – імовірність присутності людей в приміщенні; $P_{ев.л}$ – імовірність успішної евакуації людей з приміщення, в якому виникла пожежа; $R_{без.л}(\tau_{н.е})$ – імовірність безвідмовної роботи тех-

нічного спорядження, яке спрямоване на забезпечення безпечної евакуації людей; $[\varepsilon_e]=10^{-6}$ – допустиме значення ризику евакуації людей з приміщення, в якому виникла пожежа [7]. Для довідки: ризик евакуації людей з приміщення, в якому виникла пожежа, в Росії $2,07 \cdot 10^{-4}$; в США – $4,4 \cdot 10^{-5}$; в Японії – $4,8 \cdot 10^{-5}$; в Великобританії та Франції – $6,8 \cdot 10^{-5}$.

Розглянемо визначення складових залежності (11).

1. *Імовірність безвідмовної роботи пожежних сповіщувачів.*

На проміжку часу $[0, \tau]$ в більшості випадків інтенсивність відмов пожежних сповіщувачів $\lambda_c(\tau)$ є сталою величиною, тобто можна записати [5]

$$\lambda_c(\tau) = \lambda_c.$$

Згідно із ДСТУ EN 54 [6], час $T_{e.c}$ напрацювання сповіщувача на відмову (час безперервної роботи) дорівнює 10 рокам. Тоді

$$\lambda_c = \frac{1}{T_{e.c}} = \frac{1}{10 \cdot 365 \cdot 24} = 1,14 \cdot 10^{-5}, \text{ год}^{-1}. \quad (12)$$

Виходячи з того, що інтенсивність відмов пожежних сповіщувачів є сталою величиною, для визначення імовірності їх безвідмовної роботи скористаємося експоненціальним законом розподілу. Тоді, наприклад, імовірність безвідмовної роботи $R_c(\tau)$ пожежних сповіщувачів одного типу з однаковим терміном експлуатації на проміжку часу $[0, 87600]$, тобто в період від початку нормальної експлуатації (при $\tau=0$) до напрацювання на відмову (при $\tau=87600$ год за 10 років) буде

$$R_c(\tau) = \exp[-\lambda_c \tau] = \exp[-1,14 \cdot 10^{-5} \cdot 87600] = 0,368. \quad (13)$$

У випадку, коли в приміщенні об'єкта встановлено сповіщувачі різних років випуску, визначають імовірність безвідмовної роботи $R_{cj}(\tau)$ для кожної групи $j = 1, 2, 3, \dots, m$ сповіщувачів з урахуванням часу експлуатації кожної групи за залежністю (13) і визначають загальне значення імовірності безвідмовної роботи $R_c(\tau)$ за залежністю

$$R_c(\tau) = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - R_{cj}(\tau)), \quad (14)$$

де m – загальне число груп сповіщувачів.

Тоді ризик відмови системи сповіщення ε_c буде

$$\varepsilon_c = 1 - R_c(\tau). \quad (15)$$

2. *Імовірність присутності людей $P_{np.l}$ в приміщенні.*

$$P_{np.l} = \frac{\tau_{np.l}}{24}; \quad (16)$$

де $\tau_{np.l}$ – час присутності людей на робочих місцях громадських та адміністративних споруд; в більшості випадків $\tau_{np.l} = 8$ год; для споруд житлового сектора $\tau_{np.l} = 24$ год.

3. *Імовірність успішної евакуації людей $P_{ев.л}$ з приміщення, в якому виникла пожежа.*

Для визначення $P_{ев.л}$ необхідно знати інтервал часу від початку пожежі до початку евакуації $\tau_{n.e}$. Цей час, згідно із рекомендаціями [4], для будівель, які споряджені системою сповіщення та керуванням евакуацією, знаходиться в межах $\tau_{n.e} = 3 \dots 6$ хв. Тоді

$$P_{ев.л} = \frac{0,8 \tau_k - \tau_e}{\tau_{n.e}}. \quad (17)$$

4. *Імовірність безвідмовної роботи технічного спорядження $R_{без.л}(\tau_{n.e})$, яке спрямоване на забезпечення безпечної евакуації людей, залежить від часу напрацювання на відмову $T_{в.без.л}$ технічного спорядження. До такого спорядження відносять пристрій для автоматичного відкривання евакуаційних дверей, який спрацьовує від сигналу системи пожежних сповіщувачів. Згідно з паспортом на цей пристрій гарантійний термін безвідмовної роботи становить два роки, тобто $T_{в.без.л} = 17520$ год = 1051200 хв. Тоді*

$$R_{без.л}(\tau_{n.e}) = \exp[-\lambda \tau_{n.e}], \quad (18)$$

де $\lambda = 1/1051200 = 9,5 \cdot 10^{-7} \text{ хв}^{-1}$ – інтенсивність відмови пристрою для автоматичного відкривання евакуаційних дверей.

Висновки

1. Розроблено метод визначення ризику евакуації людей з громадських і адміністративних споруд та споруд житлового сектора при пожежі з урахуванням її критичного часу, що дозволяє заздалегідь впроваджувати необхідні заходи протипожежного захисту і в першу чергу системи сигналізації і автоматичного пожежогасіння.

2. При виконанні аудиту пожежної небезпеки громадських і адміністративних споруд та споруд житлового сектора, а також при розробленні оперативних планів гасіння пожеж на цих об'єктах обов'язково необхідно враховувати ризик можливості евакуації людей з осередку пожежі упродовж її критичного часу.

3. Необхідна подальша робота з метою удосконалення та спрощення методу прогнозування ризику евакуації людей за рахунок накопичення та розширення банку даних для цієї тематики.

Список літератури:

- 1. Кошмаров Ю.А.** Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении / Ю.А.Кошмаров. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.
- 2. ГОСТ 12.1.004 – 91.** Пожарная безопасность. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 31 с.
- 3. Гуліда Е.М.** Прогнозування величини оптичної густини диму при пожежі в приміщенні / Гуліда Е.М. // Зб. наукових праць «Пожежна безпека» №18, 2011 / Львів: ЛДУ БЖД. – С. 65-70.
- 4. Холщевников В.В.** Моделирование людских потоков / Холщевников В.В. // Моделирование пожаров и взрывов. – М.: Изд. «Пожнаука», 2000. – С. 139-169.
- 5. Диллон Б.** Инженерные методы обеспечения надежности систем / Б. Диллон, Ч. Сингх. – М.: Мир, 1984. – 318 с.
- 6. ДСТУ EN 54** Системи пожежної сигналізації.
- 7. Самошин Д.А.** Расчет пожарных рисков для общественных, жилых и административных зданий / Самошин Д.А. – 46 с // www.akademygps.ru.
- 8. Пузач С.В.** Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности / С.В. Пузач. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.

Э.Н. Гулида, И.А. Мовчан

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РИСКА ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ ИЗ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В СЛУЧАЕ ПОЖАРА С УЧЕТОМ ЕГО КРИТИЧЕСКОГО ВРЕМЕНИ

На основании анализа основных положений теории надежности и вероятности были получены зависимости для определения риска эвакуации людей из общественных и административных сооружений и сооружений жилищного сектора. Полученные зависимости дают возможность прогнозировать значение риска эвакуации с учетом критического времени пожара для обеспечения защиты людей и материальных ценностей от пожара, который является очень важным для внедрения разных мероприятий с целью предотвращения возникновения пожара.

Ключевые слова: риск эвакуации, пожар, критическое время пожара, интенсивность отказов.

**DETERMINATION OF RISK OF EVACUATION OF PEOPLE IS FROM
BUILDINGS AND BUILDINGS IN THE CASE OF FIRE
TAKING INTO ACCOUNT ITS CRITICAL TIME**

On the basis of analysis of substantive provisions of theory of reliability and probability dependences were got for determination of risk of evacuation of people from public and administrative buildings and buildings of housing sector. The got dependences enable to forecast the value of risk of evacuation taking into account critical time of fire for providing of defence of people and financial values from a fire which is very important for introduction of different measures with the purpose of prevention of origin of fire.

Key words: risk of evacuation, fire, critical time of fire, intensity of refuses.

