

УДК 614.841

Д. П. Дубінін, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-8948-5240)

А. А. Лісняк, к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0001-5526-1513)

С. М. Шевченко, к.т.н., викл. каф. (ORCID 0000-0002-6740-9252)

І. М. Грицина, к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0002-2581-1614)

Ю. І. Гапоненко, викл. каф. (ORCID 0000-0003-0854-5710)

Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

РОЗРАХУНКОВИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ ПРИ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖІ

Об'єктом дослідження є процес оцінювання стану сталевих конструкцій будівель при розвитку пожежі. Обґрунтовано та проаналізовано використання стандартних кривих пожеж, як ISO 834, ASTM E119, що визначають температурну залежність у часі. На підставі цього запропоновано розрахунковий метод з визначення швидкості зміни температури для захищених та незахищених сталевих конструкцій з використанням кривих пожеж. Для захисту сталевих конструкцій від високої температури використовувалися такі вогнезахисні засоби, як теплоізоляційні плити, гіпсокартонні листи та цементно-піщана штукатурка з відповідними тактико-технічними характеристиками. За отриманими результатами дослідження встановлено, що найбільш ефективним вогнезахисним засобом для сталевих конструкцій є теплоізоляційні плити, а найменш ефективним цементно-піщана штукатурка. Це визначено за рахунок різниці температури, так відповідно до ISO 834 для теплоізоляційної плити на 5 годині впливу, температура становить 896,2 °С, а для гіпсокартону – 474,8 °С, цементно-піщаної штукатурки – 316,25 °С. Так відповідно до ASTM E119 для теплоізоляційної плити на 5 годину впливу, температура становить 869,85 °С, а для гіпсокартону – 463,34 °С, цементно-піщаної штукатурки – 310,70 °С. З проведених результатів дослідження можна зазначити, що стандартні криві пожежі ISO 834 та ASTM E119 дають змогу проводити дослідження та визначати швидкість зміни температури при цьому слід зазначити що суттєво вони не відрізняються між собою. Також отримані графічні залежності, для сталевих конструкцій з урахуванням засобів вогнезахисту та стандартних кривих пожеж ISO 834 та ASTM E119. Отримані результати дослідження дають змогу підвищити рівень пожежної безпеки будівель та споруд на стадіях проектування та експлуатації, а також вчасно визначати граничний (критичний) стан сталевих конструкцій під час проведення оперативних дій з гасіння пожеж.

Ключові слова: пожежа, швидкість зміни температури, сталеві конструкції, криві пожежі, вогнезахисний засіб

1. Вступ

Під час будівництва будівель та споруд використовуються будівельні матеріали такі як природні та штучні кам'яні матеріали, залізобетон та конструкції з нього, метали, будівельні розчини тощо. При розвитку пожежі в будівлі, будівельні матеріали втрачають свої показники такі як цілісність, несуча та теплоізолювальна здатність [1, 2]. На стадії проектування та експлуатації будівельні матеріали покривають вогнезахисними засобами [3], а при виникненні горіння в будівлі використовують засоби пожежогасіння [4]. Так, на рис. 1 наведено стан сталевих конструкцій будівель після пожежі [5].

Основна небезпека сталевих конструкцій при розвитку пожежі полягає у тому, що вони дуже швидко втрачають міцність, при цьому стають більш пластичними, а лінійні температурні деформації викликають зміни розмірів, короблення і, навіть, руйнування конструкцій. Сталеві конструкції мають високу теплопровідність і невисоку температурну міцність, тому вогнезахист полягає в підвищенні термостійкості, а також у створенні на поверхні сталевих конструкцій теплоізолюючих екранів, що здатні витримати дію вогню або високих температур.



Рис. 1. Стан сталевих конструкцій будівель після пожежі

Таким чином, досить актуальною є проблема визначення стану сталевих конструкцій будівлі при розвитку пожеж під час дотримання вимог пожежної безпеки при будівництві та експлуатації будівель і споруд, а також під час проведення оперативних дій особовим складом пожежно-рятувального підрозділу.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

В роботах [6, 7] автори проводять експериментальні та чисельні дослідження щодо стану сталевих конструкцій при розвитку пожежі але при цьому не враховано застосування різних видів вогнезахисних засобів та їх порівняльна складова. Так, в роботі [8] наведене використання статистичних моделей, що сформульовані для сталевих конструкцій під час дії вогню та після нього. За результатами дослідження встановлено, що кожне нове випробування безпосередньо покращує показники та параметри моделей, що раніше були запропоновані. Дані дослідження показують актуальність застосування новітніх методів щодо проведення досліджень в сфері пожежної безпеки під час випробувань сталевих конструкцій. Однак, авторами в роботі не проводилося дослідження, щодо стану захищених сталевих конструкцій вогнезахисними засобами.

В роботі [9] використовували в дослідженнях криву температури від часу відповідно до стандарту ASTM E119. Даний стандарт представляє основу для проектування пожежного середовища у приміщенні розмірами $10 \times 7 \times 3,8$ м. За результатами досліджень встановлено, що за належного проектування та контролю криву «час-температура» для стандартних випробувань на вогнестійкість можна наблизити в реальному приміщенні. Однак побудова кривих в даному випадку «час-температура» залежить, насамперед, від запропонованих в роботі розмірів приміщення.

В роботі [10] авторами проведені дослідження механічних властивостей елементів CFSSOHS після впливу вогню відповідно до стандарту ISO-834. За результатами досліджень запропоновані емпіричні рівняння для прогнозування механічних властивостей елементів CFSSOHS після пожежі. Побудова кривих відповідно до даного стандарту є визначальною при створенні моделей та методик випробування сталевих конструкцій. Однак, авторами не розглядалося порівняння отриманих результатів у вигляді стандартної кривої пожежі ISO-834 з іншою кривою пожежі ASTM E119.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми для сталевих конструкцій

як незахищених, так і захищених вогнезахисним засобом при розвитку пожежі є визначення швидкості зміни температури та порівняння кривих пожеж ISO-834 та ASTM E119.

3. Мета і завдання дослідження

Метою даної роботи є визначення швидкості зміни температури для сталевих конструкцій, як незахищених так і захищених вогнезахисним засобом при розвитку пожеж, а також порівняння кривих пожеж.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

- обґрунтувати та розробити метод розрахунку швидкості зміни температури незахищених та захищених сталевих конструкцій вогнезахисним засобом;
- здійснити порівняння отриманих результатів у виді кривих пожеж, щодо розрахунку часу температури сталевих конструкцій, як для незахищених так і для захищених вогнезахисним засобом.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес оцінювання стану сталевих конструкцій будівель при розвитку пожежі. Основною гіпотезою дослідження є побудова стандартних кривих пожеж та порівняльна характеристика вогнезахисних засобів для сталевих конструкцій, як для захищених так і для незахищених.

В якості вогнезахисних засобів використовуються гіпсокартонні листи, теплоізоляційні плити та цементно-піщана штукатурка. Фізико-хімічна характеристика вогнезахисних засобів наведена в табл. 1.

Табл. 1. Види вогнегасних засобів та їх фізико-хімічна характеристика [11]

№ з/п	Найменування вогнезахисного засобу	Товщина, мм	Щільність, кг/м ³	Теплопровідність, Вт/(м·К)	Питома теплоємність, Дж/кг·К
1.	гіпсокартонні листи	6	850	0,15	950
2.	цементно-піщана штукатурка	10	1800	0,87	900
3.	теплоізоляційні плити	100	135	0,04	840

Для оцінювання стану сталевих конструкцій та порівняння отриманих результатів дослідження сталевих конструкцій, як незахищених так і захищених вогнезахисним засобом при розвитку пожеж використовували стандартні криві пожеж ISO-834 та ASTM E119, що визначають температурну залежність від часу. При цьому враховувалися значення на 1, 5 та 10 годину розвитку пожеж, що були отримані під час проведення дослідження стану сталевих конструкцій.

5. Розробка розрахункового методу для визначення швидкості зміни температури сталевих конструкцій

Так, стандарт [12] дозволяє моделювати дію вогню для визначення вогнетійкості за допомогою стандартної кривої пожежі від температури до часу відповідно до [13]. Ця крива визначається як [14]:

$$T = 20 + 345 \cdot \log(8t + 1), \quad (1)$$

де T – середня температура в випробувальній печі (°C); в t – час перевірки (хв).

Стандартною кривою пожежогасіння, яка використовується в США під час дослідження сталевих конструкцій, є крива температура-час [15]. Ця крива визначається як [14]:

$$750\left(1 - e^{-3,79553\sqrt{t_n}}\right) + 170,41\sqrt{t_n} + T_0, \quad (2)$$

де t_n – час випробування (хв).

Для проведення розрахунку температури сталевих конструкцій, як захищених вогнезахисним засобом так і не захищених, при розвитку пожежі за допомогою вище наведених стандартних кривих застосуємо наступну систему рівнянь [16].

Так, швидкість зміни температури незахищених сталевих конструкцій визначається за допомогою рівняння:

$$dT_{\text{steel}}/dt = F/V \cdot 1/(\rho_s c_s) \cdot \left[h(T_{\text{fire}} - T_{\text{steel}}) + \varepsilon \sigma (T_{\text{fire}}^4 - T_{\text{steel}}^4) \right], \quad (3)$$

де dT_{steel}/dt – швидкість зміни температури сталі; F – площа поверхні (m^2); V – об'єм сталі (m^3); ρ_s – щільність сталі (7820 кг/м^3); c_s – питома теплоємність сталі ($460 \text{ Дж/кг}\cdot\text{K}$); T_{fire} – температура пожежі (°C); T_{steel} – температура сталі (°C); ε – це коефіцієнт випромінювання (0,6); σ – стала Стефана-Больцмана $5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/}(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, h – коефіцієнт теплопередачі ($25 \text{ Вт/}(\text{m}^2 \cdot \text{K})$).

Швидкість зміни температури захищених сталевих конструкцій вогнезахисними засобами визначається за допомогою рівняння:

$$dT_{\text{steel}}/dt = F/V \cdot k_i / (d_i \rho_s c_s) \cdot \left[\rho_s c_s / (\rho_s c_s + (F/V d_i \rho_s c_s) / 2) \right] \cdot (T_{\text{fire}} - T_{\text{steel}}), \quad (4)$$

де k_i – теплопровідність ($\text{Вт/}(\text{м}\cdot\text{K})$); d_i – товщина ізоляції (м).

З урахуванням рівнянь (1–4) та видів вогнезахисних засобів, фізико-хімічна характеристика, яких наведена в табл. 1, проведемо розрахунок температур сталевих конструкцій (колон, балок), як захищених так і незахищених вогнезахисним засобом при розвитку пожежі за допомогою стандартних кривих час-температура відповідно до стандартів [13, 15].

6. Побудова кривих пожеж ISO-834 та ASTM E119 для сталевих конструкцій

З урахуванням рівнянь (1–2) для сталевих конструкцій побудовані стандартні криві пожеж «час-температура» відповідно до [13, 15] та фізико-хімічних властивостей сталі, що представлені на рис. 2.

Побудуємо графічні залежності для сталевих конструкцій з урахуванням засобів вогнезахисту, що наведені в табл. 1 та стандартних кривих пожеж [13, 15] з використанням рівнянь (1–4).

Отримані порівняльні графічні залежності представлені на рис. 3–5.

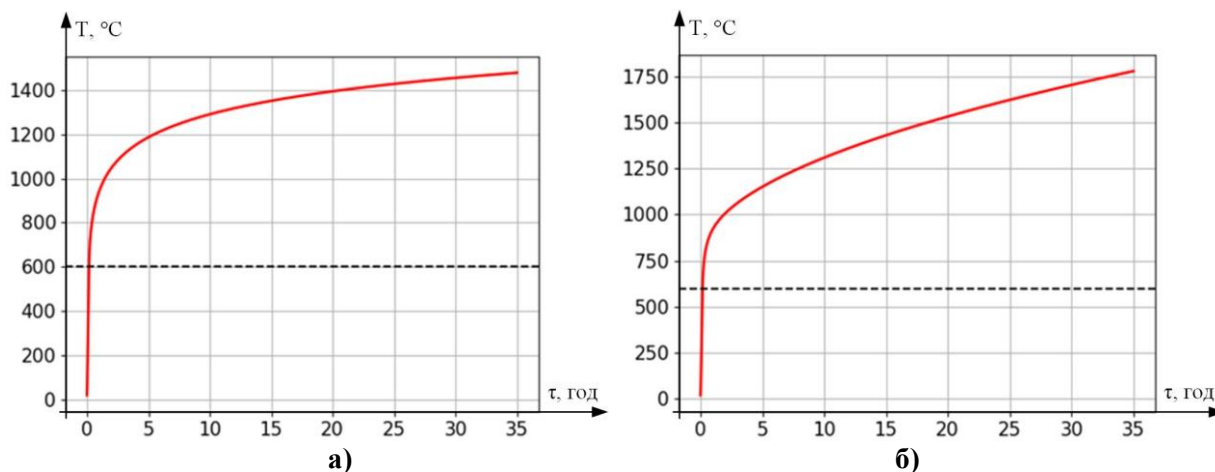


Рис. 2. Стандартні криві пожежі для сталевих конструкцій: а – крива пожежі ISO 834; б – крива пожежі ASTM E119

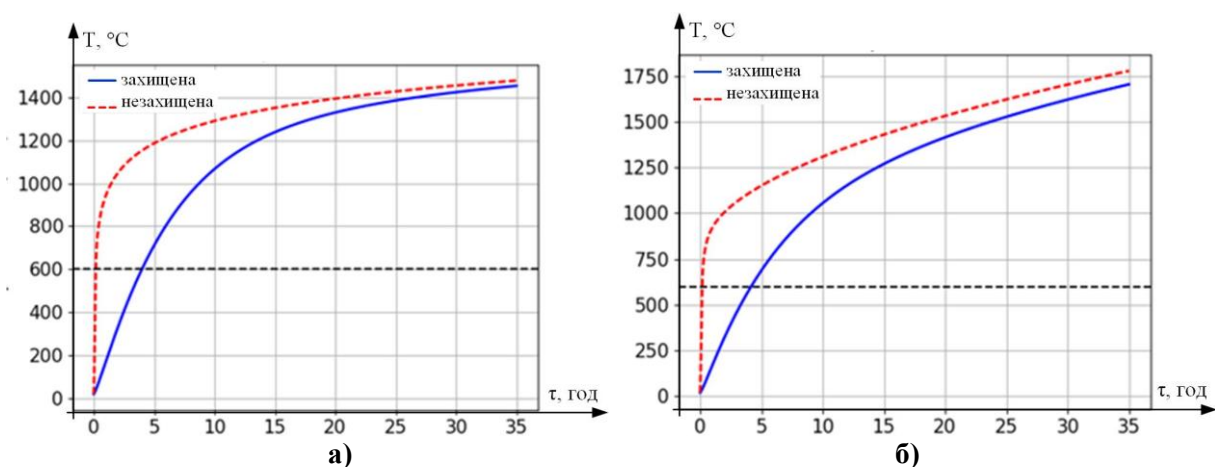


Рис. 3. Порівняльний графік: а – криві ISO 834 та криві сталевих конструкцій, що захищені гіпсокартоном; б – криві ASTM E119 та криві сталевих конструкцій, що захищені гіпсокартоном

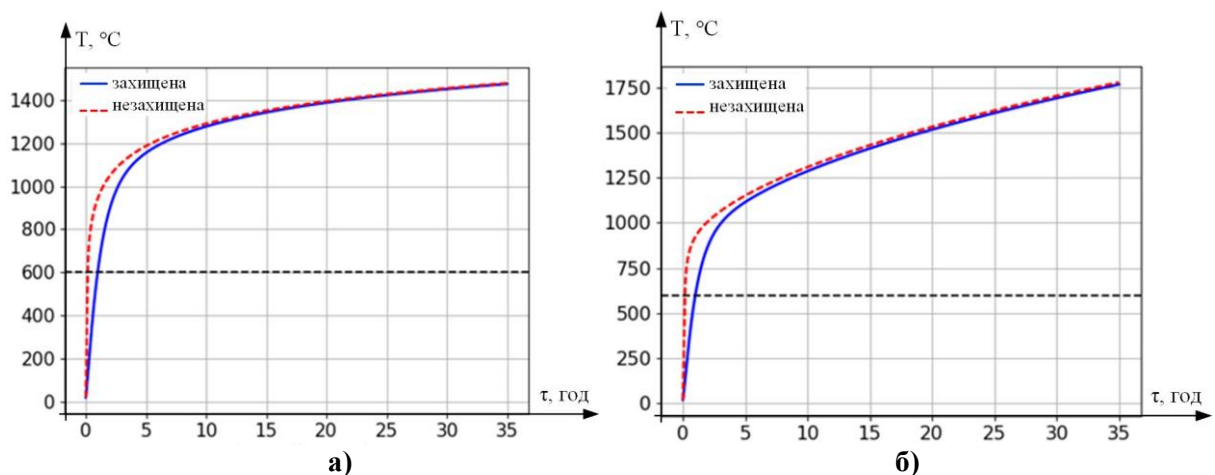


Рис. 4. Порівняльний графік: а – криві ISO 834 та криві сталевих конструкцій, що захищені цементно-піщаною штукатуркою; б – криві ASTM E119 та криві сталевих конструкцій, що захищені цементно-піщаною штукатуркою

Отримані графічні залежності дозволяють обґрунтувати доцільність застосування різних засобів вогнезахисту для сталевих конструкцій при розвитку пожежі та насамперед захистити їх від впливу високої температури при пожежі, а саме від деформації та подальшого руйнування.

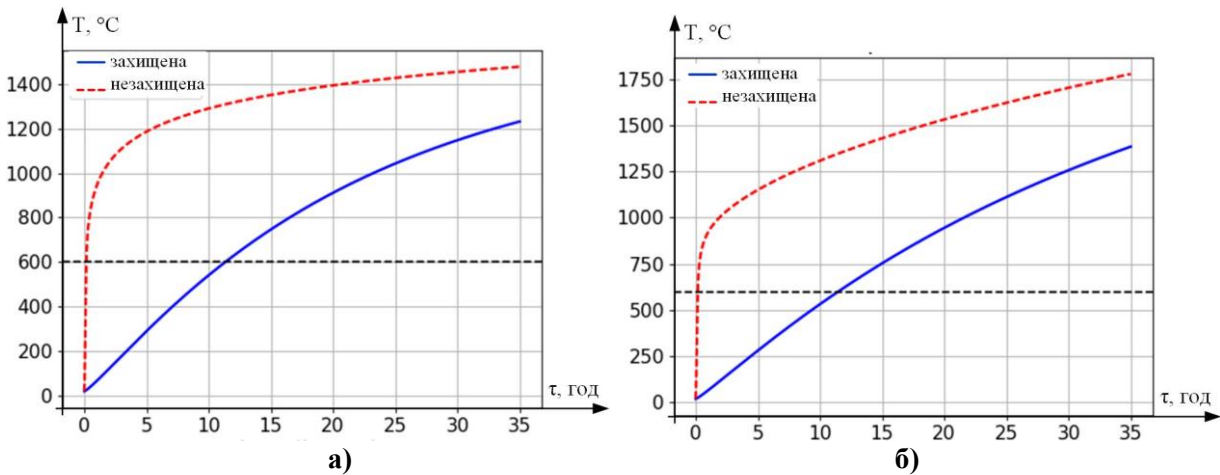


Рис. 5. Порівняльний графік: а – кривої ISO 834 та кривої сталевих конструкцій, що захищені теплоізоляційними плитами; б – кривої ASTM E119 та кривої сталевих конструкцій, що захищені теплоізоляційними плитами

За отриманими результатами дослідження проаналізовано стан сталевих конструкцій на 1, 5 та 10 годину розвитку пожежі, що представлені в табл. 2.

7. Обговорення та порівняння результатів дослідження стану сталевих конструкцій при пожежі

Для проведення оцінювання стану сталевих конструкцій запропоновано та застосування розрахункового методу з визначення швидкості зміни температури сталевих конструкцій при розвитку пожежі, що ґрунтується на застосуванні стандартних кривих пожеж ISO-834 та ASTM E119. Окрім побудови цих кривих в залежності від фізико-хімічних властивостей сталі проведено порівняння вогнезахисних засобів, що використовуються для захисту сталевих конструкцій при розвитку пожежі. В якості вогнезахисних засобів для сталевих конструкцій в роботі використовували гіпсокартонні листи, теплоізоляційні плити та цементно-піщану штукатурку, характеристика яких наведена в табл. 1.

Табл. 2. Результати дослідження сталевих конструкцій

Час, год	Температура сталевих конструкцій за ISO 834, °C			Температура сталевих конструкцій за ASTM E119, °C		
	не захищена	захищена	різниця	не захищена	захищена	різниця
гіпсокартонні листи						
1,0	943,15	170,91	772,24	921,73	169,54	752,19
5,0	1186,03	711,23	474,8	1150,60	687,26	463,34
10	1289,98	1066,55	223,43	1308,75	1055,13	253,62
цементно-піщана штукатурка						
1,0	943,15	234,24	708,91	921,73	232,26	689,47
5,0	1186,03	869,78	316,25	1150,60	839,90	310,7
10	1289,98	1177,43	112,55	1308,75	1169,20	139,55
теплоізоляційні плити						
1,0	943,15	66,06	877,09	921,73	65,66	856,07
5,0	1186,03	289,83	896,2	1150,60	280,75	869,85
10	1289,98	540,96	749,02	1308,75	532,10	776,65

З використанням рівнянь (1–2) отримані графіки стандартних кривих пожеж ISO-834 та ASTM E119, що представлені на рис. 2, а з використанням рівнянь (1–4)

отримані порівняльні графіки незахищених та захищених сталевих конструкцій, що наведені на рис. 3–5. Так, на рис. 2 наведено стандартні криві пожеж ISO 834 та ASTM E119 для сталевих конструкцій відповідно до умов, що визначені в розділі 5. На рис. 3 наведено порівняльний графік стандартних кривих пожеж ISO 834 та ASTM E119 для сталевих конструкцій, що захищені гіпсокартоном, відповідно на рис. 5 для сталевих конструкцій, що захищені цементно-піщаною штукатуркою, а на рис. 6 для сталевих конструкцій, що захищені теплоізоляційними плитами.

Проводячи порівняльний аналіз рис. 3–5, щодо значень температури в залежності від часу розвитку пожежі, отримані результати дослідження (табл. 2), за якими встановлено, що найбільш ефективним вогнезахисним засобом для сталевих конструкцій є теплоізоляційні плити, а найменш ефективним цементно-піщана штукатурка. Це пояснюється різницею температури (табл. 2), наприклад, відповідно до ISO 834 для теплоізоляційної плити на 5 год впливу, температура становить 896,2 °С, а для гіпсокартону – 474,8 °С, цементно-піщаної штукатурки – 316,25 °С. Так відповідно до ASTM E119 для теплоізоляційної плити на 5 год впливу, температура становить 869,85 °С, а для гіпсокартону – 463,34 °С, цементно-піщаної штукатурки – 310,70 °С. З проведених результатів дослідження можна зазначити, що стандартні криві пожежі ISO 834 та ASTM E119 дають змогу проводити дослідження та визначати швидкість зміни температури при цьому слід зазначити що суттєво вони не відрізняються між собою.

Використання запропонованого розрахункового методу дозволяє проводити оцінювання стану сталевих конструкцій, як незахищених так і захищених вогнезахисним засобом при розвитку пожеж, а також визначити доцільність використання для захисту від впливу підвищеної температури. При цьому отримані результати в роботі дають змогу моделювати ситуації в будівлі, що можуть виникати при розвитку пожежі за допомогою сучасного пакету прикладних програм. Також в подальшому порівняння отриманих результатів розрахункових методом доцільно узагальнювати з експериментальними дослідженнями за наявності сучасної матеріальної бази.

8. Висновки

1. Обґрунтовано та розроблено метод розрахунку швидкості зміни температури незахищених та захищених сталевих конструкцій вогнезахисними засобами за рахунок використання стандартних кривих пожеж ISO 834 та ASTM E119, що визначають температурну залежність у часі. В якості вогнезахисних засобів для захисту сталевих конструкцій від високої температури використовувалися теплоізоляційні плити, гіпсокартонні листи та цементно-піщана штукатурка з відповідними фізико-хімічними характеристиками.

2. За результатами дослідження отримані значення температури в залежності від часу розвитку пожежі та графічні залежності для сталевих конструкцій, як для незахищених так і для захищених вогнезахисним засобом. Проведено порівняльний аналіз отриманих результатів дослідження у виді кривих пожеж для сталевих конструкцій. Так за отриманими значеннями встановлена різниця температури як захищених так і незахищених сталевих конструкцій, як критерій ефективності використання вогнезахисного засобу. Так аналізуючи значення в табл. 2 встановлено, що з використанням кривої пожежі ISO 834 для теплоізоляційної плити на 5 год. впливу, температура становить 896,2 °С, а для гіпсокартону – 474,8 °С, це-

ментно-піщаної штукатурки – 316,25 °С. А з використанням кривої пожежі ASTM E119 для теплоізоляційної плити на 5 год впливу, температура становить 869,85 °С, а для гіпсокартону – 463,34 °С, цементно-піщаної штукатурки – 310,70 °С. З урахуванням вище наведеним, можна зазначити, що найбільш ефективним вогнезахисним засобом для сталевих конструкцій є теплоізоляційні плити, а найменш ефективним цементно-піщана штукатурка.

Література

1. Дубінін Д. П., Лісняк А. А., Шевченко С. М., Криворучко Є. М., Гапоненко Ю. І. Експериментальне дослідження розвитку пожежі в будівлі. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2021. № 34. С. 110–121. doi: 10.52363/2524-0226-2021-34-8
2. Дубінін Д. П., Лісняк А. А., Шевченко С. М., Криворучко Є. М., Гапоненко Ю. І. Дослідження впливу будівельного матеріалу конструкції будівлі на розвиток внутрішньої пожежі. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2022. № 35. С. 175–185. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-13
3. Наказ МВС від 26.12.2018 року № 1064 «Про затвердження Правил з вогнезахисту». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0259-19#Text>
4. Дубінін Д. П. Дослідження вимог до перспективних засобів пожежогасіння тонкорозпиленою водою. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2021. № 33. С. 15–29. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-2
5. Yilmaz D. G. Fire Safety of Tall Buildings: Approach in Design and Prevention. 5th International Conference of Contemporary Affairs in Architecture and Urbanism (ICCAUA-2022). P. 206–216. doi: 10.38027/ICCAUA2022EN0215
6. Sadkovyi V., Andronov V., Semkiv O. et al. Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER, 2021. 180 p. doi: 10.15587/978-617-7319-43-5
7. Bicer A., Kar F. Thermal and mechanical properties of gypsum plaster mixed with expanded polystyrene and tragacanth. Thermal Science and Engineering Progress. 2017. 1. P. 59–65. doi: 10.1016/j.tsep.2017.02.008
8. Wang H., Nie, S., Li, J. Reduction model of hot- and cold-rolled high-strength steels during and after fire. Fire Safety Journal. 2022. 129. P. 103563. doi: 10.1016/j.firesaf.2022.103563
9. Zhang C., Grosshandler W., Sauca A. et al. Design of an ASTM E119 Fire Environment in a Large Compartment. Fire Technol. Fire Technology. 2020. 56. P. 1155–1177. doi: 10.1007/s10694-019-00924-7
10. Chen M.-T., Pandey M., Young B. Mechanical Properties of Cold-formed Steel Semi-oval Hollow Sections after exposure to ISO-834 fire. Thin-Walled Structures. 2021. 167. P. 108202. doi: 10.1016/j.tws.2021.108202
11. Миргород О. В., Пушкаренко А. С., Васильченко О. В., Квітковський Ю. В., Луценко Ю. В. Вогнезахисне оброблення будівельних матеріалів і конструкцій. НУЦЗУ, КП «Міська друкарня», 2011. 176 р.
12. BS EN 1991-1-2:2002 Eurocode 1. Actions on structures General actions. Actions on structures exposed to fire, 2002.
13. ISO 834-11:2014 Fire resistance tests – Elements of building construction – Part 11: Specific requirements for the assessment of fire protection to structural steel elements, 2014.

14. Dzidic S. Fire Resistance of RC Slabs according to ACI/TMS 216.1 and EC 2 – Possibility for Comparison. Zbornik radova Građevinskog fakulteta. 2018. 34. P. 43–53. doi: 10.14415/konferencijaGFS2018.003
15. ASTM E119: Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials, 2018.
16. Buchanan A. H., Abu A. K. Structural Design for Fire Safety. University of Canterbury, 2017. № 2. 440 p.

D. Dubinin, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

A. Lisniak, PhD, Associate Professor, Head of Department

S. Shevchenko, PhD, Lecturer of the Department

I. Gritsina, PhD, Associate Professor, Deputy Head of Department

Yu. Gaponenko, Lecturer of the Department

National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

CALCULATION METHOD OF ASSESSING THE CONDITION OF STEEL STRUCTURES OF BUILDINGS IN THE EVENT OF FIRE

The object of the study is the process of assessing the condition of steel structures of buildings in the event of a fire. The use of standard fire curves, such as ISO 834, ASTM E119, which determine the temperature dependence over time, is substantiated and analyzed. Based on this, a calculation method for determining the rate of temperature change for protected and unprotected steel structures using fire curves is proposed. To protect steel structures from high temperature, such fire-resistant means as heat-insulating plates, plasterboard sheets and cement-sand plaster with appropriate tactical and technical characteristics were used. Based on the results of the study, it was established that the most effective fire protection means for steel structures are heat-insulating plates, and the least effective is cement-sand plaster. This is determined due to the difference in temperature, so according to ISO 834 for a heat-insulating board at 5 hours of exposure, the temperature is 896,2 °C, and for plasterboard – 474,8 °C, cement-sand plaster – 316,25 °C. Thus, according to ASTM E119, for a heat-insulating board for 5 hours of exposure, the temperature is 869,85 °C, and for plasterboard – 463,34 °C, cement-sand plaster – 310,70 °C. From the results of the research, it can be noted that the standard fire curves of ISO 834 and ASTM E119 make it possible to conduct research and determine the rate of temperature change, while it should be noted that they do not significantly differ from each other. Graphical dependences are also obtained for steel structures taking into account fire protection measures and standard fire curves ISO 834 and ASTM E119. The obtained results of the study make it possible to increase the level of fire safety of buildings and structures at the stages of design and operation, as well as to determine the limit (critical) state of steel structures in time during fire extinguishing operations.

Keywords: fire, rate of temperature change, steel structures, fire curves, fire retardant

References

1. Dubinin, D., Lisniak, A., Shevchenko, S., Krivoruchko, I., Gaponenko, Yu. (2021). Eksperymental'ne doslidzhennja rozvytku pozhezhi v budivli. Problemy nadzvychajnyh sytuacij, 34, 110–121. doi: 10.52363/2524-0226-2021-34-8
2. Dubinin, D. P., Lisnjak, A. A., Shevchenko, S. M., Krivoruchko, E. M., Gaponenko, Ju. I. (2022). Doslidzhennja vplivu budivel'nogo materialu konstrukcii budivli na rozvitok vnutrishn'oï pozhezhi. Problemy nadzvychajnyh sytuacij, 34, 175–185. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-13
3. Nakaz MVS № 1064. (2018). Pro zatverdzhennja Pravyl z vognezahystu. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0259-19#Text>
4. Dubinin, D. (2021). Doslidzhennja vymog do perspektyvnyh zasobiv pozhezhogasinnja tonkorozpylenoju vodoju. Problemy nadzvychajnyh sytuacij, 33, 15–29. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-2

5. Yilmaz, D. G. (2022). Fire Safety of Tall Buildings: Approach in Design and Prevention. 5th International Conference of Contemporary Affairs in Architecture and Urbanism (ICCAUA-2022), 206–216. doi: 10.38027/ICCAUA2022EN0215
6. Sadkovyi, V., Andronov, V., Semkiv, O. et al. (2021). Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER, 180. doi: 10.15587/978-617-7319-43-5
7. Bicer, A., Kar, F. (2017). Thermal and mechanical properties of gypsum plaster mixed with expanded polystyrene and tragacanth. Thermal Science and Engineering Progress, 1, 59–65. doi: 10.1016/j.tsep.2017.02.008
8. Wang, H., Nie, S., Li, J. (2022). Reduction model of hot- and cold-rolled high-strength steels during and after fire. Fire Safety Journal, 129, 103563. doi: 10.1016/j.firesaf.2022.103563
9. Zhang, C., Grosshandler, W., Sauca, A. et al. (2020). Design of an ASTM E119 Fire Environment in a Large Compartment. Fire Technol. Fire Technology, 56, 1155–1177. doi: 10.1007/s10694-019-00924-7
10. Chen, M.-T., Pandey, M., Young, B. (2021). Mechanical Properties of Cold-formed Steel Semi-oval Hollow Sections after exposure to ISO-834 fire. Thin-Walled Structures, 167, 108202. doi: 10.1016/j.tws.2021.108202
11. Mirgorod, O. V., Pushkarenko, A. S., Vasil'chenko, O. V. (2011). Vognezahisne obroblyannja budivel'nih materialiv i konstrukcij. NUCZU.
12. BS EN 1991-1-2:2002. (2002). Eurocode 1. Actions on structures General actions. Actions on structures exposed to fire.
13. ISO 834-11:2014. (2014). Fire resistance tests – Elements of building construction – Part 11: Specific requirements for the assessment of fire protection to structural steel elements.
14. Dzidic, S. (2018). Fire Resistance of RC Slabs according to ACI/TMS 216.1 and EC 2 – Possibility for Comparison. Zbornik radova Građevinskog fakulteta, 34, 43–53. doi: 10.14415/konferencijaGFS2018.003
15. ASTM E119. (2018). Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials.
16. Buchanan, A. H., Abu, A. K. (2017). Structural Design for Fire Safety. University of Canterbury, 2, 440.

Надійшла до редколегії: 06.03.2023

Прийнята до друку: 11.04.2023