

УДК 614.841.45

ВИЗНАЧЕННЯ ПРОМІЖКУ ЧАСУ ЗБЕРЕЖЕНОСТІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕСУЧИХ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ З РІЗНОЮ ПОЧАТКОВОЮ ТЕМПЕРАТУРОЮ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.4-21>

Новак С. В.^{1*}, ORCID iD 0000-0001-7087-318X

Добростан О. В.¹, ORCID iD 0000-0001-8908-0729

Пустовий М. М.², ORCID iD 0000-0003-1434-4296

*E-mail: novak.s.fire@gmail.com

¹Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна

²Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

29.09.2023

Пройшла рецензування:

16.10.2023

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

коефіцієнт
теплопровідності, критична
температура, початкова
температура, проміжок часу
збереженості вогнестійкості,
сталева конструкція,
температурний режим,
теплофізичні властивості.

АНОТАЦІЯ

Це дослідження присвячене визначенню проміжку часу збереженості вогнестійкості несучих сталевих конструкцій без огорожувальної функції, які мають під час випробування різну початкову температуру. За мету ставилось виявлення впливу початкової температури таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту, на проміжок часу збереженості їхньої вогнестійкості, для широких діапазонів параметрів цих конструкцій (теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, товщини вогнезахисту, критичної температури і коефіцієнта поперечного перерізу конструкції) та обґрунтування температурного показника для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості цих конструкцій за несучою здатністю. Встановлено, що для застосованого під час розрахунків діапазону параметрів сталевих конструкцій різниця між значеннями проміжку часу до досягнення нормованої критичної температури, отриманими за мінімально допустимої початкової температури 10 °C і номінальної початкової температури 20 °C, може досягати 2,33%, а різниця між значеннями, отриманими за максимально допустимої початкової температури 40 °C, – 3,67%. Виявлено, що для визначення значення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій, яке є найбільш наближеним до номінального значення, необхідне застосування показника, яким є проміжок часу до досягнення коригованої критичної температури. Розкрито залежність різниці між цією коригованою критичною температурою і нормованою критичною температурою від параметрів сталевих конструкцій. Показано, що у разі застосування цього показника відхил розрахункового проміжку часу збереженості вогнестійкості, визначеного за мінімально і максимально допустимих значень початкової температури сталевих конструкцій, від проміжку часу за номінальної початкової температури не перевищує 0,89%, що є прийнятною точністю для інженерних розрахунків.

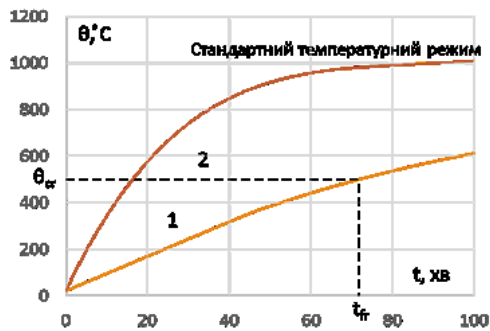
Постановка проблеми. Відповідно до Єврокоду 3 [1] і національного стандарту ДСТУ-Н Б В.2.6-211 [2] для несучих сталевих конструкцій без огорожувальної функції, таких як балки і колони (далі – сталеві конструкції), застосовні спрощені методи, за якими оцінювання вогнестійкості цих конструкцій здійснюють в температурних параметрах через порівняння фактичної температури сталевих конструкцій θ_a (далі – температури сталі) в умовах вогневого

впливу з її критичною температурою θ_{cr} . Цією критичною температурою є така, за якої очікується руйнування сталевих конструкцій у разі рівномірного розподілу температури у ній для заданого рівня навантаження, і її значення визначаються розрахунковим чи експериментальним шляхом або надаються в певних нормативних документах [1–2]. Для зазначеного оцінювання вогнестійкості вважають, що несуча здатність сталевих

конструкції зберігається, якщо виконується така умова [1–2]:

$$\theta_a \leq \theta_{cr}. \quad (1)$$

У разі застосування цієї умови для сценарію умовної пожежі визначають температуру сталі для різних проміжків часу вогневого впливу t і проміжок часу t_{fr} до досягнення критичної температури (рис. 1), який відповідає проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції за несучою здатністю.



1 – крива температури сталі; 2 – горизонтальна лінія, що відповідає критичній температурі

Рисунок 1 – Приклад залежності температури сталі від проміжку часу вогневого впливу для сценарію умовної пожежі за стандартного температурного режиму

Такий підхід щодо визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій застосовують в значній кількості стандартизованих методів. Зокрема, його впроваджено в методи, наведені в EN 13381-4 [3], EN 13381-6 [4], EN 13381-8 [5], EN 13381-9 [6], EN 13381-10 [7], за якими визначають залежності між проміжком часу збереженості вогнестійкості, необхідною мінімальною товщиною вогнезахисту та іншими параметрами сталевих конструкцій, оснащених пасивними або реактивними системами вогнезахисту. Під час випробувань, які здійснюють за цими стандартами, вимірюють температуру сталі для набору зразків сталевих балок та (або) колон для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму і визначають проміжки часу до досягнення значень температури сталі від 350°C до 700°C (з кроком 50°C). Також цей підхід упроваджено в методи оцінювання

властивостей горизонтальних і вертикальних вогнезахисних екранів, призначених для вогнезахисту несучих сталевих конструкцій, які наведено в EN 13381-1 [8] і EN 13381-2 [9]. Під час випробувань за цими методами визначають проміжки часу до досягнення значень температури сталі 510°C (для балок [8], суцільних колон і порожнистих колон, заповнених бетоном, з армувальними стрижнями [9]) і 350°C (для порожнистих колон, заповнених бетоном, без армувальних стрижнів [9]). Такий же підхід упроваджено і в методи, наведені в EN 16623 [10], за якими оцінюють стійкість до зовнішніх впливів і відповідність інших експлуатаційних характеристик передбачуваному використанню для сталевих конструкцій, оснащених системами вогнезахисту з реактивним покриттям. Під час випробувань за цим стандартом визначають значення проміжку часу до досягнення температури сталі 500°C на металевій поверхні захищених сталевих колон або захищених сталевих пластин.

Потрібно зауважити, що у всіх наведених вище методах запроваджено однакові умови вогневого впливу на зразки сталевих конструкцій (вплив за стандартного температурного режиму) і вимоги щодо початкового середнього значення температури зразків, яке має бути в діапазоні від 10°C до 40°C , що регламентовано 5.1 і 10.3 EN 1363-1 [11]. Проте у разі випробування за однакових умов вогневого впливу однакових зразків сталевих конструкцій, які мають різну початкову температуру сталі, не можна виключати можливості отримання для цих зразків різних результатів визначення проміжку часу до досягнення певної температури сталі. Це пов'язано з відмінністю між значеннями кількості теплоти, необхідної для нагрівання цих зразків від початкової до певної температури сталі. Наприклад, під час нагрівання сталевій конструкції від мінімально допустимої початкової температури 10°C до 500°C значення кількості теплоти на $6,5\%$

$(100 \times ((500 - 10) - (500 - 40)) / (500 - 40))$ є більшим, ніж під час її нагрівання до цієї температури від максимально допустимої початкової температури 40 °C. Можливо, більш правильно було б для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій за несучою здатністю (з метою усунення впливу неоднаковості початкової температури зразків) застосовувати інший показник, ніж проміжок часу вогневого впливу до досягнення критичної температури. Для будівельних конструкцій, які виконують огорожувальну функцію, визначають проміжок часу збереженості вогнестійкості за теплоізолювальною здатністю, якою відповідно до 3.1.9 1363-1 [11] є здатність конструкції обмежувати підвищення температури на її необігрівній поверхні до менших значень, ніж задані. Згідно з 11.3 1363-1 [11] під час випробувань цих конструкцій для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості за теплоізолювальною здатністю встановлюють не проміжки часу вогневого впливу до досягнення певних температур на необігрівній поверхні конструкції, а проміжки часу, за якими підвищення середньої та максимальної температур на необігрівній поверхні конструкції відносно початкової середньої температури цієї поверхні становить 140 °C і 180 °C відповідно. Можливо, запровадження для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій за несучою здатністю показника, яким є підвищення температури сталі щодо її початкової температури, замість показника щодо досягнення певної критичної температури, дасть змогу підвищити точність визначення цього проміжку часу. Однак на підтвердження цієї гіпотези в джерелах інформації не наведено відповідних даних. Отже, є підстави вважати, що недостатня обґрунтованість температурного показника для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій за несучою здатністю зумовлює необхідність проведення дослідження в цьому напрямі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні немає загальноприйнятого єдиного критерію, який визначає втрату вогнестійкості сталевих конструкцій. Традиційно цю втрату оцінюють з погляду критичної температури сталеві конструкції та її максимальної деформації або швидкості деформації [12].

Із застосуванням критерію деформації досліджено вогнестійкість суцільних і порожнистих сталевих колон і балок в широкому діапазоні їх поперечного перерізу, виготовлених із різних матеріалів, в умовах рівномірного і нерівномірного нагрівання. Зокрема, досліджено вогнестійкість аксіально навантажених двотаврових колон з вуглецевої сталі і виявлено вплив співвідношення їхньої ширини до товщини та залишкової напруженості на несучу здатність [13]. У роботі [14] вивчено вплив різних параметрів на вогнестійкість квадратних порожнистих колон із нержавкої сталі у разі осевого стиснення й встановлено нові формули для граничної несучої здатності цих конструкцій за підвищених температур. Результати дослідження, наведені в роботі [15], показали, що сталеві колони, піддані нерівномірному нагріванню, втрачали несучу здатність за нижчих середніх температур сталі, ніж колони, піддані рівномірному нагріванню. Однак колони, які піддавалися рівномірному нагріванню, досягали своїх температур руйнування швидше, ніж колони, піддані нерівномірному нагріванню. Дослідженням несучої здатності суцільних і порожнистих сталевих балок за підвищених температур виявлено, що у разі теплового впливу тільки з нижньої поверхні балки прогин був меншим, ніж за теплового впливу лише на бічні грані балки [16].

Дослідження із застосуванням критерію критичної температури в основному зосереджені на конструкціях із вуглецевої сталі. В роботі [17] аналізували критичні температури сталевих конструкцій поперечного перерізу 4 класу, і запропонували для них діапазон

критичної температури від 400 °C до 600 °C, в той час як в Єврокод 3 [1] це значення становить 350 °C. З огляду на результати розвідок, наведених у роботі [18], виявлено, що модель аналізу кінцевих елементів (FEA), яка використовує властивості сталі, регламентовані Національним інститутом стандартів і технологій США (NIST), може передбачити критичну температуру, яка відповідає граничній деформації сталевій колони, точніше, ніж модель FEA з використанням властивостей сталі, наведених в Єврокод 3 [1]. Крім того, температура руйнування сталевій колони, яка піддається локальному вогневому впливу, може бути нижчою, ніж температура руйнування, визначена для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму. Дослідження вогнестійкості холодноформованих сталевих колон показали, що критична температура сталевих колон із нерівномірним розподілом температури вища, ніж у колон із рівномірним розподілом температури [19–20]. За результатами досліджень закріплених суцільних сталевих колон встановлено, що критичні температури цих конструкцій знижуються зі збільшенням структурної жорсткості для малих ексцентриситетів навантаження [21–23]. На підставі даних випробувань і валідованих моделей кінцево-елементного аналізу визначено уточнені критичні температури для сталевих колон, заповнених бетоном [24].

Порівняння різних структурних і теплових критеріїв втрати вогнестійкості сталевих конструкцій (гранична деформація, критична температура), наведене в роботі [12], показує, що між ними немає узгодженості, а критерій критичної температури не може точно передбачити втрату несучої здатності в часі, просторі або режимі руйнування сталевих конструкцій, які піддаються як рівномірному, так і нерівномірному нагріванню. Втрату вогнестійкості сталевих конструкцій можна передбачити лише за допомогою розширеного структурного аналізу, тому для

проектування цих конструкцій недостатньо лише теплового аналізу. Проте в цій роботі показано, що використання критерію критичної температури для простих сталевих конструкцій призводить до консервативних результатів оцінювання їхньої вогнестійкості.

Наведені вище результати досліджень дають змогу обґрунтовано підходити до оцінювання вогнестійкості суцільних і порожнистих сталевих конструкцій різного поперечного перерізу в умовах їхнього рівномірного і нерівномірного нагрівання. Однак у результатах цих досліджень немає даних щодо точності визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості таких конструкцій – проміжку часу до досягнення граничної деформації або критичної температури. Також не наведено параметрів, які можуть впливати на цю точність, яким, зокрема, є початкова температура конструкції до вогневого впливу. Визначення зазначеного проміжку часу за різною початковою температурою може призвести до результатів, які не є однаковими. Така невизначеність не дає змоги вибрати температурний показник, який придатний для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій за несучою здатністю з прийнятною точністю.

Формулювання цілей дослідження. За мету дослідження ставилось виявлення впливу початкової температури таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту, на проміжок часу збереженості їхньої вогнестійкості, для широких діапазонів параметрів цих конструкцій (теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, товщини вогнезахисту, критичної температури і коефіцієнта поперечного перерізу конструкції) та обґрунтування температурного показника для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій за несучою здатністю.

Для досягнення цієї мети було поставлено такі завдання:

– для умов вогневого впливу за

стандартного температурного режиму і широкого діапазону параметрів сталеві конструкції з одношаровою системою вогнезахисту визначити дані щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості цієї конструкції за різних значень її початкової температури (номінального $\theta_{0,nom} = 20$ °C, мінімально допустимого $\theta_{0,min} = 10$ °C і максимально допустимого $\theta_{0,max} = 40$ °C);

– визначити дані щодо різниці між значеннями проміжку часу збереженості вогнестійкості сталеві конструкції з одношаровою системою вогнезахисту, отриманими за початкових температур $\theta_{0,min}$ і $\theta_{0,max}$, і значеннями цього проміжку часу за номінальної початкової температури $\theta_{0,nom}$;

– виявити залежності цієї різниці між проміжками часу збереженості вогнестійкості від параметрів сталеві конструкції з одношаровою системою вогнезахисту;

– обґрунтувати температурний показник, придатний для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій за несучою здатністю з прийнятною точністю.

Методи дослідження. Застосовано метод дослідження, складовими якого є обчислювальна процедура чисельного моделювання теплового стану сталеві конструкції, оснащеної вогнезахисним покриттям із заданими теплофізичними властивостями, в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму (процедура розв’язання прямої задачі теплопровідності), процедури аналізу, порівняння, узагальнення, апроксимації та систематизації отриманих розрахункових даних із використанням лінійного числового регресійного аналізу. Для розрахунку теплового стану сталеві конструкції в умовах вогневого впливу (температури сталі для різних проміжків часу вогневого впливу) використано одномірну двошарову математичну модель теплопровідності, яка складається із системи рівнянь, наведеної в [25]. Значення коефіцієнтів тепловіддачі конвекцією і теплового випромінювання на

обігрівній поверхні вогнезахисного покриття, теплофізичні властивості сталі та інші параметри цієї моделі вибрані такими, як наведено в [1–2; 26]. Розв’язання математичної моделі й прямої задачі теплопровідності з визначення температури сталі виконано методом кінцевих різниць за неявною схемою апроксимації [27].

Виклад основного матеріалу.

Розв’язанням прямої задачі теплопровідності для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму і широкого діапазону параметрів сталеві конструкції з одношаровою системою вогнезахисту визначали дані щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості цієї конструкції за різних значень її початкової температури θ_0 (номінального $\theta_{0,nom} = 20$ °C, мінімально допустимого $\theta_{0,min} = 10$ °C і максимально допустимого $\theta_{0,max} = 40$ °C). Водночас розглядали два варіанти, для одного з них (варіант № 1) показником для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості було досягнення критичної температури, а для іншого (варіант № 2) – досягнення коригованої критичної температури, значення якої залежить від початкової температури θ_0 . Таким чином, для варіанта № 1 проміжок часу збереженості вогнестійкості дорівнював тривалості вогневого впливу до досягнення критичної температури θ_{cr} , а для варіанта № 2 – до досягнення коригованої критичної температури $\theta_{cr,mod}$, яку розраховували за формулою (2). Наприклад, для критичної температури θ_{cr} , яка становить 500 °C, для варіанта № 1 визначали проміжок часу $t_{fr,10}$ змінювання температури сталі від початкової $\theta_{0,min} = 10$ °C до $\theta_{cr} = 500$ °C і проміжок часу $t_{fr,40}$ змінювання температури сталі від початкової $\theta_{0,max} = 40$ °C до $\theta_{cr} = 500$ °C, а для варіанта № 2 визначали проміжок часу $t_{fr,10}$ змінювання температури сталі від початкової $\theta_{0,min} = 10$ °C до $\theta_{cr,mod} = 490$ °C і проміжок часу $t_{fr,40}$ змінювання температури сталі від початкової $\theta_{0,max} = 40$ °C до $\theta_{cr,mod} = 520$ °C.

$$\theta_{cr,mod} = \theta_{cr} - \theta_{0,nom} + \theta_0. \quad (2)$$

Процедуру визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції за різних значень їхньої початкової температури, теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу (його коефіцієнта теплопровідності λ_p і питомої теплоємності $c_p\rho_p$), товщини вогнезахисту $d_{p,min}$, коефіцієнта поперечного перерізу захищеної сталевій конструкції A_p/V і критичної температури θ_{cr} вибрано такою.

Для стандартного температурного режиму і одношарової системи вогнезахисту з необхідною мінімальною товщиною $d_{p,min}$ через розв'язання прямої задачі теплопровідності визначали проміжок часу ($t_{fr,10}$ або $t_{fr,40}$), за якого розрахункова температура сталевій конструкції $\theta_{a,cal}$ з коефіцієнтом поперечного перерізу A_p/V дорівнює критичній температурі θ_{cr} (для варіанта № 1) або коригованій критичній температурі $\theta_{cr,mod}$ (для варіанта № 2), за умови, що початкова температура цієї конструкції дорівнює її мінімально

допустимому значенню $\theta_{0,min} = 10$ °С або максимально допустимому значенню $\theta_{0,max} = 40$ °С. Ці розрахунки виконували для значень A_p/V , λ_p , θ_{cr} , $d_{p,min}$, t_{fr} , наведених у табл. 1, і $c_p\rho_p = 500$ кДж/(м³·°С) ($c_p = 1000$ Дж/(кг·°С), $\rho_p = 500$ кг/м³), які взято з роботи [25]. У цій таблиці наведено дані щодо необхідної мінімальної товщини одношарової системи вогнезахисту $d_{p,min}$, отримані для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму за такими параметрами сталевій конструкції: $(A_p/V)_{min} = 40$ м⁻¹, $(A_p/V)_{med} = 150$ м⁻¹, $(A_p/V)_{max} = 300$ м⁻¹; $\lambda_{p,min} = 0,02$ Вт/(м·°С), $\lambda_{p,med} = 0,2$ Вт/(м·°С), $\lambda_{p,max} = 2,0$ Вт/(м·°С); $\theta_{cr,min} = 350$ °С, $\theta_{cr,med} = 500$ °С, $\theta_{cr,max} = 700$ °С; $\theta_{cr,min} = 350$ °С, $\theta_{cr,med} = 500$ °С, $\theta_{cr,max} = 700$ °С, $t_{fr,min} = 30$ хв; $t_{fr,med} = 90$ хв; $t_{fr,max} = 240$ хв. Наявні прочерки в табл. 1 пов'язані з тим, що для зазначених параметрів (A_p/V , λ_p , $\theta_{cr,max}$, $t_{fr,min}$) сталева конструкція не потребує вогнезахисту.

Таблиця 1 – Дані щодо необхідної мінімальної товщини вогнезахисту, отримані для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму і номінальної початкової температури сталевій конструкції [25]

A_p/V , м ⁻¹	λ_p , Вт/(м·°С)	Необхідна мінімальна товщина вогнезахисту $d_{p,min}$ (у мм) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,max}$
40	0,02	0,44	0,17	—	2,07	1,13	0,49	6,75	3,94	1,98
150	0,02	1,89	0,96	0,29	7,28	4,26	1,99	20,2	13,2	7,15
300	0,02	3,64	1,97	0,68	12,1	7,74	3,90	28,7	20,8	12,7
40	0,2	4,25	1,64	—	19,4	11,1	4,83	56,5	35,9	19,1
150	0,2	15,8	8,78	2,81	48,1	33,0	17,8	105	80,4	53,2
300	0,2	24,3	15,4	6,21	61,3	46,1	28,8	122	98,1	71,5
40	2,0	35,4	14,8	—	135	88,0	43,8	311	233	149
150	2,0	83,6	55,3	22,3	208	161	107	404	331	251
300	2,0	101	73,3	38,5	229	184	132	427	356	279

Отримані через розв'язання прямої задачі теплопровідності розрахункові значення проміжків часу $t_{fr,10}$ та $t_{fr,40}$, визначені для варіантів № 1 і № 2, наведено в табл. 2, 3 і табл. 4, 5 відповідно. В цих таблицях $d_{p,min,30}$, $d_{p,min,90}$, $d_{p,min,240}$ — це значення товщини вогнезахисту, які дорівнюють величинам необхідної мінімальної товщини вогнезахисту $d_{p,min}$ (див. табл. 1), отриманим відповідно для проміжків часу вогневого впливу $t_{fr,min} = 30$ хв, $t_{fr,med} = 90$ хв, $t_{fr,max} = 240$ хв за

стандартного температурного режиму і номінальної початкової температури $\theta_{0,nom} = 20$ °С. У цих таблицях, також як і в деяких інших, які зазначені в цьому дослідженні, наведено стандартні відхилення S (середньо квадратичні відхилення) і відносні стандартні відхилення. Наприклад, у табл. 2 для $\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,30}$ вказано значення $S = 0,12$ хв і значення відносного стандартного відхилення $100S/t_{fr,10} = 100 \times 0,12/30,4 = 0,40\%$.

Таблиця 2 – Дані щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості $t_{fr,10}$, отримані за мінімально допустимою початковою температурою сталеві конструкції для варіанта № 1

A_p/V , M^{-1}	λ_p , Вт/(м·°C)	Проміжок часу $t_{fr,10}$ (у хв) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,240}$
40	0,02	30,7	30,2	—	91,4	90,6	90,1	243,7	242,5	241,4
150	0,02	30,4	30,2	30,1	91,5	90,8	90,2	244,6	243,1	240,7
300	0,02	30,4	30,2	30,1	91,4	90,8	90,4	243,7	242,2	241,5
40	0,2	30,4	30,2	—	91,5	91,5	90,2	243,9	242,2	241,6
150	0,2	30,4	30,2	30,1	91,2	90,8	90,3	243,3	242,2	240,8
300	0,2	30,4	30,2	30,1	91,1	90,8	90,2	244,3	242,1	240,9
40	2,0	30,3	30,2	—	91,7	90,7	90,4	243,2	242,2	241,5
150	2,0	30,3	30,2	30,1	91,2	90,6	90,8	243,5	242,0	241,7
300	2,0	30,3	30,2	30,1	91,3	91,0	90,7	243,5	242,3	240,9
Середнє значення		30,4	30,2	30,1	91,4	90,8	90,4	243,7	242,3	241,2
Стандартний відхил		0,12	0,00	0,00	0,19	0,27	0,24	0,46	0,33	0,39
Відносний стандарт- ний відхил, %		0,40	0,00	0,00	0,20	0,30	0,27	0,19	0,13	0,16

Таблиця 3 – Дані щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості $t_{fr,40}$, отримані за максимально допустимою початковою температурою сталеві конструкції для варіанта № 1

A_p/V , M^{-1}	λ_p , Вт/(м·°C)	Проміжок часу $t_{fr,40}$ (у хв) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,240}$
40	0,02	29,4	29,7	—	87,0	88,3	89,5	231,2	235,5	238,2
150	0,02	29,2	29,7	29,9	87,3	88,5	89,3	233,3	236,3	237,6
300	0,02	29,4	29,6	29,9	87,5	88,6	89,5	233,1	235,7	238,4
40	0,2	29,1	29,5	—	87,3	89,2	89,3	232,2	235,4	238,4
150	0,2	29,1	29,6	29,9	87,4	88,8	89,4	233,3	235,9	237,6
300	0,2	29,3	29,6	29,9	87,6	88,7	89,4	234,8	235,9	237,5
40	2,0	29,1	29,5	—	87,9	88,5	89,4	233,2	235,8	238,2
150	2,0	29,3	29,6	29,9	87,8	88,5	89,1	234,0	235,8	238,2
300	2,0	29,3	29,6	29,9	87,8	88,9	89,2	233,9	235,6	237,3
Середнє значення		29,2	29,6	29,9	87,5	88,7	89,3	233,2	235,8	237,93
Стандартний відхил		0,12	0,07	0,00	0,29	0,27	0,13	1,04	0,26	0,43
Відносний стандарт- ний відхил, %		0,42	0,24	0,00	0,34	0,30	0,15	0,45	0,11	0,18

Таблиця 4 – Дані щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості $t_{fr,10}$, отримані за мінімально допустимою початковою температурою сталеві конструкції для варіанта № 2

A_p/V , M^{-1}	λ_p , Вт/(м·°C)	Проміжок часу $t_{fr,10}$ (у хв) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,240}$
40	0,02	29,7	29,7	—	88,3	88,1	87,2	235,6	235,9	233,7
150	0,02	29,4	29,3	28,9	88,6	88,3	87,0	237,3	236,8	233,1
300	0,02	29,4	29,3	28,8	88,6	88,4	87,3	237,3	236,7	234,3
40	0,2	29,4	29,4	—	88,5	89,0	87,2	236,5	235,9	234,0
150	0,2	29,4	29,3	28,8	88,7	88,5	87,3	237,3	236,9	234,1
300	0,2	29,6	29,3	28,8	88,9	88,7	87,6	239,0	237,3	234,9
40	2,0	29,4	29,4	—	89,2	88,4	87,5	237,3	236,8	234,7
150	2,0	29,6	29,5	29,0	89,2	89,2	88,4	238,4	237,5	236,2
300	2,0	29,7	29,5	29,1	89,3	89,2	88,0	238,5	237,7	236,1
Середнє значення		29,5	29,4	28,90	88,8	88,6	87,5	237,5	236,8	234,6
Стандартний відхил		0,14	0,14	0,13	0,36	0,40	0,44	1,05	0,63	1,04
Відносний стандарт- ний відхил, %		0,46	0,46	0,44	0,40	0,46	0,51	0,44	0,27	0,44

Таблиця 5 – Дані щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості $t_{fr,40}$, отримані за максимально допустимої початкової температури сталеві конструкції для варіанта № 2

A_p/V , M^{-1}	λ_p , $Вт/(м \cdot ^\circ C)$	Проміжок часу $t_{fr,40}$ (у хв) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,240}$
40	0,02	31,4	31,5	–	93,5	93,5	96,7	248,0	249,2	257,0
150	0,02	31,3	31,5	32,8	93,4	93,8	96,8	248,1	249,3	255,9
300	0,02	31,2	31,5	32,9	93,1	93,6	97,0	246,3	247,4	255,5
40	0,2	31,2	31,2	–	93,3	94,7	96,5	247,5	248,5	256,7
150	0,2	31,2	31,4	32,7	92,7	93,4	96,6	245,3	246,9	253,3
300	0,2	31,1	31,3	32,8	92,2	93,0	96,0	245,9	245,8	251,0
40	2,0	31,1	31,1	–	93,2	93,2	96,2	245,5	247,0	254,7
150	2,0	30,9	31,2	32,5	92,4	92,5	95,7	244,6	245,2	250,3
300	2,0	30,8	31,1	32,4	92,0	92,6	94,2	244,2	244,8	248,0
Середнє значення		31,1	31,3	32,7	92,9	93,4	96,2	246,2	247,1	253,6
Стандартний відхил		0,19	0,17	0,19	0,56	0,67	0,85	1,44	1,66	3,17
Відносний стандартний відхил, %		0,60	0,54	0,59	0,60	0,71	0,88	0,58	0,67	1,25

Із аналізу даних, наведених у табл. 2, 3, випливає, що для варіанта № 1 і застосованого у розрахунках діапазону параметрів сталеві конструкції, який оцінено, проміжок часу збереженості її вогнестійкості змінюється від 30,1 хв до 244,6 хв і від 29,1 хв до 238,4 хв, відповідно за умов, що початкова температура цієї конструкції дорівнює її мінімально допустимому значенню $\theta_{0,min} = 10^\circ C$ і максимально допустимому значенню $\theta_{0,max} = 40^\circ C$. Для цього варіанта значення $t_{fr,10}$ більші за $t_{fr,40}$ (визначені для однакових параметрів сталеві конструкції). Для варіанта № 2 у цьому ж діапазоні параметрів сталеві конструкції проміжок часу збереженості її вогнестійкості змінюється від 28,8 хв до 239,0 хв і від 30,8 хв до 257,0 хв за тих же умов стосовно її початкової температури, а значення $t_{fr,10}$ менші за $t_{fr,40}$. Різниця між величинами $t_{fr,10}$ і $t_{fr,40}$ залежить від параметрів сталеві конструкції і змінюється від 0,2 хв (для $\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,30}$, $t_{fr,min}$) до 12,5 хв (для $(A_p/V)_{min}$, $\lambda_{p,min}$, $\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,240}$, $t_{fr,max}$) – для варіанта № 1, і від –1,1 хв (для $(A_p/V)_{max}$, $\lambda_{p,max}$, $\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,30}$, $t_{fr,min}$) до –23,3 хв (для $(A_p/V)_{min}$, $\lambda_{p,min}$, $\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,240}$, $t_{fr,max}$) – для варіанта № 2.

У табл. 6, 7 (для варіанта № 1) і табл. 8, 9 (для варіанта № 2) наведено дані щодо різниці між значеннями проміжку

часу збереженості вогнестійкості сталеві конструкції ($t_{fr,10}$ і $t_{fr,40}$), отриманими за умови, що її початкова температура дорівнює мінімально допустимому значенню $\theta_{0,min} = 10^\circ C$ або максимально допустимому значенню $\theta_{0,max} = 40^\circ C$ (див. табл. 2, 3 і табл. 4, 5), і значеннями такого ж проміжку часу t_{fr} ($t_{fr,min} = 30$ хв; $t_{fr,med} = 90$ хв; $t_{fr,max} = 240$ хв) за номінальної початкової температури $\theta_{0,nom} = 20^\circ C$. Цю різницю розраховували за такими формулами:

$$\delta_{t,10} = 100(t_{fr,10} - t_{fr})/t_{fr}; \quad (3)$$

$$\delta_{t,40} = 100(t_{fr,40} - t_{fr})/t_{fr}, \quad (4)$$

де $\delta_{t,10}$ – різниця між значенням проміжку часу збереженості вогнестійкості сталеві конструкції, отриманим за мінімально допустимої початкової температури $\theta_{0,min} = 10^\circ C$, і значенням цього проміжку часу за номінальної початкової температури $\theta_{0,nom} = 20^\circ C$, %;

$\delta_{t,40}$ – різниця між значенням проміжку часу збереженості вогнестійкості сталеві конструкції, отриманим за максимально допустимої початкової температури $\theta_{0,max} = 40^\circ C$, і значенням цього проміжку часу за номінальної початкової температури $\theta_{0,nom} = 20^\circ C$, %;

$t_{fr,10}$ і $t_{fr,40}$ – значення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталеві конструкції, отримані відповідно за мінімально і максимально допустимої початкової температури ($\theta_{0,min} = 10^\circ C$ і $\theta_{0,max} = 40^\circ C$), які

наведено в табл. 2, 3 (для варіанта № 1) і табл. 4, 5 (для варіанта № 2), хв;
 t_{fr} – значення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих

конструкції за номінальної початкової температури ($\theta_{0, \text{ном}} = 20^\circ\text{C}$), яке наведене в табл. 1 ($t_{fr, \text{min}} = 30$ хв; $t_{fr, \text{med}} = 90$ хв; $t_{fr, \text{max}} = 240$ хв), хв.

Таблиця 6 – Дані щодо різниці $\delta_{t,10}$ для варіанта № 1

A_p/V , м^{-1}	λ_p , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	Різниця $\delta_{t,10}$ (у %) для:								
		$\theta_{cr, \text{min}},$ $t_{fr, \text{min}}$	$\theta_{cr, \text{med}},$ $t_{fr, \text{min}}$	$\theta_{cr, \text{max}},$ $t_{fr, \text{min}}$	$\theta_{cr, \text{min}},$ $t_{fr, \text{med}}$	$\theta_{cr, \text{med}},$ $t_{fr, \text{med}}$	$\theta_{cr, \text{max}},$ $t_{fr, \text{med}}$	$\theta_{cr, \text{min}},$ $t_{fr, \text{max}}$	$\theta_{cr, \text{med}},$ $t_{fr, \text{max}}$	$\theta_{cr, \text{max}},$ $t_{fr, \text{max}}$
40	0,02	2,33	0,67	–	1,56	0,67	0,11	1,54	1,04	0,58
150	0,02	1,33	0,67	0,33	1,67	0,89	0,22	1,92	1,29	0,29
300	0,02	1,33	0,67	0,33	1,56	0,89	0,44	1,54	0,92	0,63
40	0,2	1,33	0,67	–	1,67	1,67	0,22	1,63	0,92	0,67
150	0,2	1,33	0,67	0,33	1,33	0,89	0,33	1,38	0,92	0,33
300	0,2	1,33	0,67	0,33	1,22	0,89	0,22	1,79	0,87	0,38
40	2,0	1,00	0,67	–	1,89	0,78	0,44	1,33	0,92	0,63
150	2,0	1,00	0,67	0,33	1,33	0,67	0,89	1,46	0,83	0,71
300	2,0	1,00	0,67	0,33	1,44	1,11	0,78	1,46	0,96	0,38
Середнє значення		1,33	0,67	0,33	1,52	0,94	0,41	1,56	0,96	0,51
Стандартний відхил		0,41	0,00	0,00	0,21	0,30	0,27	0,19	0,14	0,16

Таблиця 7 – Дані щодо різниці $\delta_{t,40}$ для варіанта № 1

A_p/V , м^{-1}	λ_p , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	Різниця $\delta_{t,40}$ (у %) для:								
		$\theta_{cr, \text{min}},$ $t_{fr, \text{min}}$	$\theta_{cr, \text{med}},$ $t_{fr, \text{min}}$	$\theta_{cr, \text{max}},$ $t_{fr, \text{min}}$	$\theta_{cr, \text{min}},$ $t_{fr, \text{med}}$	$\theta_{cr, \text{med}},$ $t_{fr, \text{med}}$	$\theta_{cr, \text{max}},$ $t_{fr, \text{med}}$	$\theta_{cr, \text{min}},$ $t_{fr, \text{max}}$	$\theta_{cr, \text{med}},$ $t_{fr, \text{max}}$	$\theta_{cr, \text{max}},$ $t_{fr, \text{max}}$
40	0,02	–2,00	–1,00	–	–3,33	–1,89	–0,56	–3,67	–1,88	–0,75
150	0,02	–2,67	–1,00	–0,33	–3,00	–1,67	–0,78	–2,79	–1,54	–1,00
300	0,02	–2,00	–1,33	–0,33	–2,78	–1,56	–0,56	–2,88	–1,79	–0,67
40	0,2	–3,00	–1,67	–	–3,00	–0,89	–0,78	–3,25	–1,92	–0,67
150	0,2	–3,00	–1,33	–0,33	–2,89	–1,33	–0,67	–2,79	–1,71	–1,00
300	0,2	–2,33	–1,33	–0,33	–2,67	–1,44	–0,67	–2,17	–1,71	–1,04
40	2,0	–3,00	–1,67	–	–2,33	–1,67	–0,67	–2,83	–1,75	–0,75
150	2,0	–2,33	–1,33	–0,33	–2,44	–1,67	–1,00	–2,50	–1,75	–0,75
300	2,0	–2,33	–1,33	–0,33	–2,44	–1,22	–0,89	–2,54	–1,83	–1,13
Середнє значення		–2,52	–1,33	–0,33	–2,76	–1,48	–0,73	–2,82	–1,76	–0,86
Стандартний відхил		0,41	0,24	0,00	0,33	0,30	0,15	0,44	0,11	0,18

Таблиця 8 – Дані щодо різниці $\delta_{t,10}$ для варіанта № 2

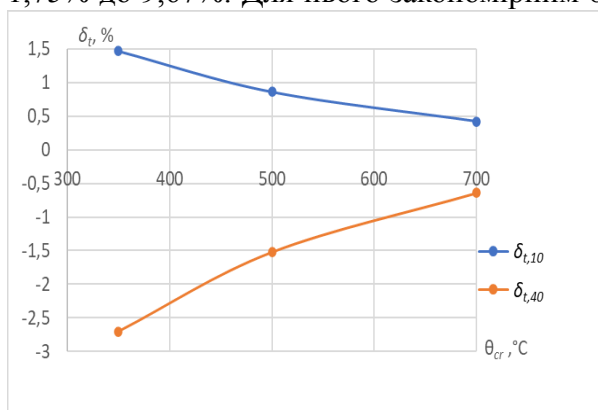
A_p/V , м^{-1}	λ_p , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	Різниця $\delta_{t,10}$ (у %) для:								
		$\theta_{cr, \text{min}},$ $t_{fr, \text{min}}$	$\theta_{cr, \text{med}},$ $t_{fr, \text{min}}$	$\theta_{cr, \text{max}},$ $t_{fr, \text{min}}$	$\theta_{cr, \text{min}},$ $t_{fr, \text{med}}$	$\theta_{cr, \text{med}},$ $t_{fr, \text{med}}$	$\theta_{cr, \text{max}},$ $t_{fr, \text{med}}$	$\theta_{cr, \text{min}},$ $t_{fr, \text{max}}$	$\theta_{cr, \text{med}},$ $t_{fr, \text{max}}$	$\theta_{cr, \text{max}},$ $t_{fr, \text{max}}$
40	0,02	–1,00	–1,00	–	–1,89	–2,11	–3,11	–1,83	–1,71	–2,63
150	0,02	–2,00	–2,33	–3,67	–1,56	–1,89	–3,33	–1,13	–1,33	–2,88
300	0,02	–2,00	–2,33	–4,00	–1,56	–1,78	–3,00	–1,13	–1,38	–2,38
40	0,2	–2,00	–2,00	–	–1,67	–1,11	–3,11	–1,46	–1,71	–2,50
150	0,2	–2,00	–2,33	–4,00	–1,44	–1,67	–3,00	–1,13	–1,29	–2,46
300	0,2	–1,33	–2,33	–4,00	–1,22	–1,44	–2,67	–0,42	–1,13	–2,13
40	2,0	–2,00	–2,00	–	–0,89	–1,78	–2,78	–1,13	–1,33	–2,21
150	2,0	–1,33	–1,67	–3,33	–0,89	–0,89	–1,78	–0,67	–1,04	–1,58
300	2,0	–1,00	–1,67	–3,00	–0,78	–0,89	–2,22	–0,63	–0,96	–1,63
Середнє значення		–1,63	–1,96	–3,67	–1,32	–1,51	–2,78	–1,06	–1,32	–2,27
Стандартний відхил		0,46	0,45	0,42	0,40	0,45	0,49	0,44	0,26	0,43

Таблиця 9 – Дані щодо різниці $\delta_{t,40}$ для варіанта № 2

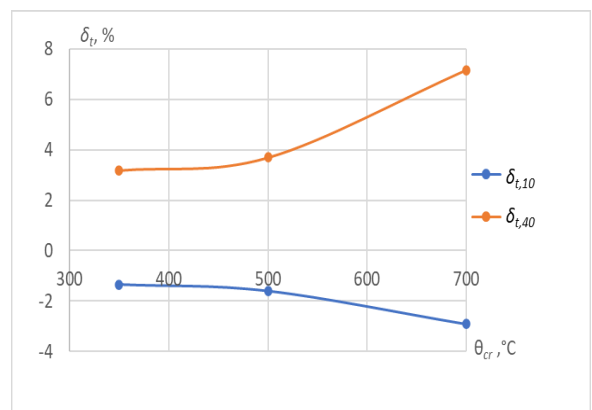
A_p/V , м^{-1}	λ_p , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	Різниця $\delta_{t,40}$ (у %) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,max}$
40	0,02	4,67	5,00	—	3,89	3,89	7,44	3,33	3,83	7,08
150	0,02	4,33	5,00	9,33	3,78	4,22	7,56	3,38	3,88	6,63
300	0,02	4,00	5,00	9,67	3,44	4,00	7,78	2,63	3,08	6,46
40	0,2	4,00	4,00	—	3,67	5,22	7,22	3,13	3,54	6,96
150	0,2	4,00	4,67	9,00	3,00	3,78	7,33	2,21	2,88	5,54
300	0,2	3,67	4,33	9,33	2,44	3,33	6,67	2,46	2,42	4,58
40	2,0	3,67	3,67	—	3,56	3,56	6,89	2,29	2,92	6,13
150	2,0	3,00	4,00	8,33	2,67	2,78	6,33	1,92	2,17	4,29
300	2,0	2,67	3,67	8,00	2,22	2,89	4,67	1,75	2,00	3,33
Середнє значення		3,78	4,37	8,94	3,19	3,74	6,88	2,57	2,97	5,67
Стандартний відхил		0,62	0,56	0,65	0,62	0,74	0,94	0,60	0,69	1,32

Із аналізу даних, наведених у табл. 6–9, випливає, що для варіанта № 1 і застосованого у розрахунках діапазону параметрів сталеві конструкції значення різниць $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$ змінюється від 0,22% до 2,33% і від –0,33% до –3,67% відповідно. Закономірним для цього варіанта є зменшення цих різниць (за модулем) з підвищенням критичної температури θ_{cr} . Зокрема, за $(A_p/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$, $\lambda_{p,med} = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, $t_{fr,med} = 90 \text{ хв}$ і підвищенні θ_{cr} від 350°C до 700°C значення різниць $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$ зменшується від 1,33% до 0,33% і від –2,89% до –0,67%, відповідно (рис. 2а). Для варіанта № 2 значення різниць $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$ змінюється відповідно від –0,63% до –4,00% і від 1,75% до 9,67%. Для нього закономірним є

збільшення цих різниць (за модулем) з підвищенням критичної температури θ_{cr} . Зокрема, за $(A_p/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$, $\lambda_{p,med} = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, $t_{fr,med} = 90 \text{ хв}$ і підвищенні θ_{cr} від 350°C до 700°C значення різниць $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$ збільшується від –1,44% до –3,00% і від 3,00% до 7,33% відповідно (рис. 2б). Для варіантів № 1 і № 2 кореляція між різницями $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$ та коефіцієнтами поперечного перерізу A_p/V і теплопровідності λ_p вогнезахисного матеріалу не спостерігається. Графічні залежності, наведені на рис. 2, побудовано за даними щодо середніх значень, які мають різниці $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$ для проміжків часу $t_{fr,min}$, $t_{fr,med}$, $t_{fr,max}$.



а



б

 Рисунок 2 – Залежності різниць $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$ від критичної температури θ_{cr} для варіантів № 1 (а) і № 2 (б)

Із порівняння даних щодо різниць $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$ (табл. 6–9), отриманих для варіантів № 1 і № 2, випливає, що застосування як показника для визначення

проміжку часу збереженості вогнестійкості сталеві конструкції коригованої критичної температури, розрахованої за формулою (2), призводить до збільшення похибки

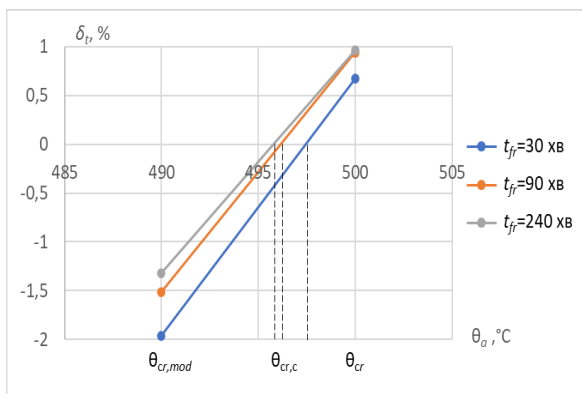
визначення цього проміжку часу відносно показника щодо досягнення критичної температури. Максимальна величина похибки (за модулем) для варіанта № 1 складає 3,67%, в той час як для варіанта № 2 вона дорівнює 9,67%. Отже, застосовувати кориговану критичну температуру, розраховану за формулою (2), як показник для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції не можна.

Слід зауважити, що у разі початкової температури, меншої за номінальну $\theta_{0,nom} = 20^\circ\text{C}$, для варіанта № 1 розрахунковий проміжок часу збереженості вогнестійкості є більшим за його номінальне (умовно точне) значення t_{fr} , а для варіанта № 2 – є меншим за нього. Для початкової температури, більшої за номінальну $\theta_{0,nom} = 20^\circ\text{C}$, для варіанта № 1 цей розрахунковий проміжок часу є меншим, ніж t_{fr} , а для варіанта № 2 – більшим за нього. Із зазначеного випливає, що для визначення значення проміжку часу

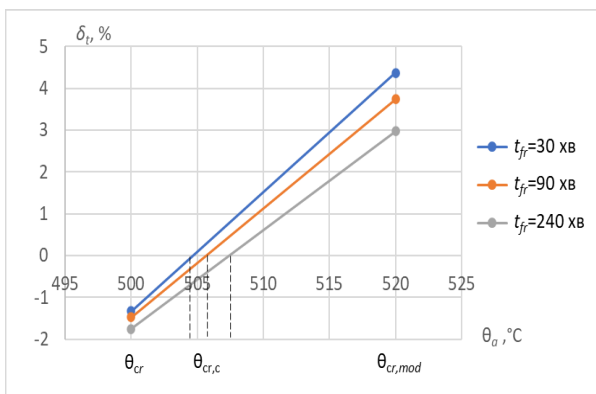
збереженості вогнестійкості сталевій конструкції, яке є найбільш наближеним до номінального значення t_{fr} , необхідне застосування показника, яким є проміжок часу до досягнення коригованої критичної температури $\theta_{cr,c}$, що перебуває в діапазоні від $\theta_{cr,mod}$ до θ_{cr} і яку визначають за формулою (5). На рис. 3, як приклад, наведено залежності різниці δ_t від температури сталі θ_a , яка має місце для проміжку часу t_{fr} збереженості вогнестійкості сталевій конструкції за номінальної початкової температури. Для побудови цих залежностей використано дані щодо середніх значень різниць $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$ (табл. 6–9) для критичної температури $\theta_{cr,med}$ і проміжків часу $t_{fr,min}$, $t_{fr,med}$, $t_{fr,max}$. Температура $\theta_{cr,c}$ дорівнює температурі сталі θ_a , за якої різниця $\delta_t = 0$ (див. рис. 3).

$$\theta_{cr,c} = \theta_{cr} + \Delta, \quad (5)$$

де Δ – різниця між температурою $\theta_{cr,c}$ і критичною температурою θ_{cr} , значення якої перебуває від 0 до $(\theta_{cr,mod} - \theta_{cr})$, $^\circ\text{C}$



а



б

 Рисунок 3 – Залежності різниці δ_t від температури сталі θ_a для $\theta_{0,min}$ (а) і $\theta_{0,max}$ (б)

За допомогою розв'язання прямої задачі теплопровідності для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму і застосованого під час розрахунків діапазону параметрів сталевій конструкції з одношаровою системою вогнезахисту визначали дані щодо температури сталі θ_a , яка має місце для проміжку часу t_{fr} за різних значень початкової температури θ_0 (мінімально допустимого $\theta_{0,min} = 10^\circ\text{C}$ і максимально

допустимого $\theta_{0,max} = 40^\circ\text{C}$). За отриманими даними щодо цієї температури сталі й формулами (6) і (7) визначали різниці Δ_{10} і Δ_{40} , значення яких наведено в табл. 10–11.

$$\Delta_{10} = \theta_{a,10} - \theta_{cr}; \quad (6)$$

$$\Delta_{40} = \theta_{a,40} - \theta_{cr}, \quad (7)$$

де Δ_{10} – різниця між температурою $\theta_{cr,c}$ і критичною температурою θ_{cr} за мінімально допустимої початкової температури $\theta_{0,min} = 10^\circ\text{C}$, $^\circ\text{C}$;

Δ_{40} – різниця між температурою $\theta_{cr,c}$ і

критичною температурою θ_{cr} за максимально допустимої початкової температури $\theta_{0,max} = 40$ °C, °C;

$\theta_{a,10}$ – температура сталі для проміжку часу t_{fr} за мінімально допустимої початкової температури, °C;

$\theta_{a,40}$ – температура сталі для проміжку часу t_{fr} за максимально допустимої початкової температури, °C.

Із аналізу даних, наведених у табл. 10 і 11, випливає, що для застосованого під час розрахунків діапазону параметрів захищеної сталеві конструкції значення різниць Δ_{10} і Δ_{40} змінюється від –0,28 % до –6,74 % і від 0,73 % до 12,56 %, відповідно. Існує їхня залежність від критичної температури θ_{cr} і проміжку часу t_{fr} . З підвищенням θ_{cr} і зниженням t_{fr}

різниці Δ_{10} і Δ_{40} зменшуються (за моделлю), що показано на рис. 4. Цей рисунок побудовано за даними щодо середніх значень, які мають різниці Δ_{10} і Δ_{40} для критичних температур $\theta_{cr,min}$, $\theta_{cr,med}$, $\theta_{cr,max}$ і проміжків часу $t_{fr,min}$, $t_{fr,med}$, $t_{fr,max}$ (див. табл. 10–11). Кореляція між різницями $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$ та коефіцієнтами поперечного перерізу A_p/V і теплопровідності λ_p вогнезахисного матеріалу не спостерігається. Значення стандартного відхилення для Δ_{10} і Δ_{40} є незначним (від 0,09 °C до 0,87 °C). Це обґрунтовує застосування середніх значень різниць Δ_{10} і Δ_{40} у розрахунках надалі.

Таблиця 10 – Дані щодо різниці Δ_{10}

A_p/V , м ⁻¹	λ_p , Вт/(м·°C)	Значення різниці Δ_{10} (у °C) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,max}$
40	0,02	–4,15	–2,62	–	–4,61	–2,92	–0,92	–5,01	–3,43	–1,28
150	0,02	–3,95	–2,17	–0,39	–4,66	–2,92	–0,85	–5,08	–3,46	–1,28
300	0,02	–3,97	–2,12	–0,28	–4,64	–2,95	–1,08	–6,74	–3,67	–1,38
40	0,2	–4,14	–2,61	–	–4,65	–2,98	–0,92	–5,12	–3,50	–1,31
150	0,2	–4,06	–2,25	–0,41	–4,85	–3,09	–0,92	–5,59	–3,90	–1,43
300	0,2	–4,28	–2,38	–0,33	–5,05	–3,36	–1,10	–5,82	–4,19	–1,69
40	2,0	–4,31	–2,73	–	–4,91	–3,13	–1,00	–5,49	–3,83	–1,50
150	2,0	–4,56	–2,62	–0,49	–5,43	–3,61	–1,23	–6,06	–4,49	–2,07
300	2,0	–4,85	–2,81	–0,53	–5,81	–3,96	–1,44	–6,27	–4,80	–2,45
Середнє значення		–4,25	–2,48	–0,41	–4,96	–3,21	–1,05	–5,69	–3,92	–1,60
Стандартний відхил		0,29	0,25	0,09	0,41	0,36	0,19	0,59	0,48	0,41

Таблиця 11 – Дані щодо різниці Δ_{40}

A_p/V , м ⁻¹	λ_p , Вт/(м·°C)	Значення різниці Δ_{40} (у °C) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,max}$
40	0,02	8,41	5,30	–	9,33	5,93	1,85	10,15	6,94	2,55
150	0,02	8,06	4,42	0,75	9,40	5,94	1,74	10,46	7,19	2,56
300	0,02	8,06	4,36	0,73	9,33	6,14	1,65	10,49	7,71	2,72
40	0,2	8,40	5,28	–	9,42	6,06	1,86	10,34	7,06	2,61
150	0,2	8,24	4,54	0,80	9,80	6,28	1,85	11,07	7,79	3,02
300	0,2	8,44	4,60	0,75	10,5	6,75	2,12	11,60	8,51	3,59
40	2,0	8,72	5,51	–	9,91	6,34	2,02	11,05	7,71	2,98
150	2,0	9,17	5,86	0,99	10,82	7,23	2,41	12,16	8,95	4,10
300	2,0	9,68	5,83	1,03	11,34	7,84	2,97	12,57	9,43	4,70
Середнє значення		8,58	5,08	0,84	9,98	6,50	2,05	11,10	7,92	3,20
Стандартний відхил		0,54	0,60	0,13	0,74	0,65	0,41	0,85	0,87	0,77

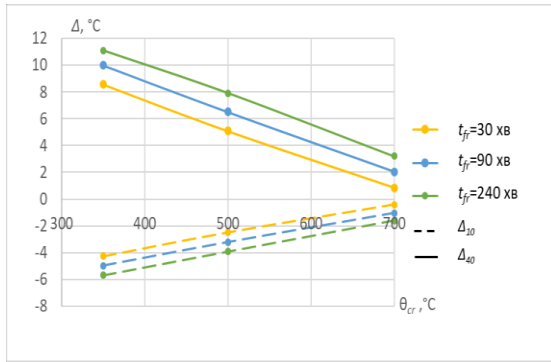


Рисунок 4 – Залежності різниці Δ_{10} (1) і Δ_{40} (2) від критичної температури θ_{cr} для різних проміжків часу t_{fr}

Для апроксимації отриманих розрахункових даних щодо різниці Δ , наведених у табл. 10 і 11, здійснено лінійний числовий регресійний аналіз із застосуванням такого рівняння:

$$\Delta = a_0 + a_1\theta_0 + a_2\theta_0 t_{fr} + a_3\theta_{cr} + a_4\theta_0\theta_{cr} + a_5\theta_0 t_{fr}\theta_{cr} + a_6 t_{fr}\theta_{cr} + a_7 t_{fr}, \quad (8)$$

де a_0 – a_7 – коефіцієнти регресії.

Розв'язуючи рівняння регресії (8) за даними щодо середніх значень різниці Δ , наведеними в табл. 12, із застосуванням програми для роботи з електронними таблицями Microsoft Excel, визначено значення коефіцієнтів регресії, які наведено в табл. 13. У таблиці 12 також зазначено розрахункові значення різниці Δ_{cal} , отримані за рівнянням (8) із використанням визначених коефіцієнтів регресії, відхилу між різницями Δ_{cal} і Δ та температури $\theta_{cr,c}$, розрахованої за формулою (6).

Таблиця 12 – Дані для розрахунку коефіцієнтів регресії

$\theta_0, ^\circ\text{C}$	$\theta_{cr}, ^\circ\text{C}$	$t_{fr}, \text{хв}$	$\Delta, ^\circ\text{C}$	$\Delta_{cal}, ^\circ\text{C}$	$(\Delta_{cal} - \Delta), ^\circ\text{C}$	$\theta_{cr,c}, ^\circ\text{C}$
20	350	30	0,00	0,03	0,03	350,03
20	500	30	0,00	0,02	0,02	500,02
20	700	30	0,00	0,00	0,00	700,00
20	350	90	0,00	0,01	0,01	350,01
20	500	90	0,00	0,01	0,01	500,01
20	700	90	0,00	0,00	0,00	700,00
20	350	240	0,00	-0,03	-0,03	349,97
20	500	240	0,00	-0,01	-0,01	499,99
20	700	240	0,00	0,01	0,01	700,01
10	350	30	-4,25	-4,00	0,25	346,00
10	500	30	-2,48	-2,48	0,00	497,52
10	700	30	-0,41	-0,47	-0,06	699,53
10	350	90	-4,96	-4,35	0,61	345,65
10	500	90	-3,21	-2,82	0,39	497,18
10	700	90	-1,05	-0,77	0,28	699,23
10	350	240	-5,69	-5,24	0,45	344,76
10	500	240	-3,92	-3,64	0,28	496,36
10	700	240	-1,60	-1,52	0,08	698,48
40	350	30	8,58	8,07	-0,51	358,07
40	500	30	5,08	5,02	-0,06	505,02
40	700	30	0,84	0,94	0,10	700,94
40	350	90	9,98	8,73	-1,25	358,73
40	500	90	6,50	5,65	-0,85	505,65
40	700	90	2,05	1,55	-0,50	701,55
40	350	240	11,10	10,37	-0,73	360,37
40	500	240	7,92	7,24	-0,68	507,24
40	700	240	3,20	3,07	-0,13	703,07

Таблиця 13 – Результати розрахунку коефіцієнтів регресії

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
-16,047	0,8060	0,00067	0,02193	-0,0011	$-1,8 \cdot 10^{-7}$	$4,52 \cdot 10^{-6}$	-0,01414

Із аналізу табл. 12 випливає, що відхил ($\Delta_{cal} - \Delta$) змінюється від $-0,73$ °C до $0,61$ °C, а його середнє значення і стандартний відхил відповідно складають $-0,08$ °C і $0,42$ °C, що свідчить про задовільну збіжність даних щодо різниці Δ_{cal} , отриманих за рівнянням (8), з даними щодо різниці Δ .

Через розв'язання прямої задачі теплопровідності для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму і застосованого у розрахунках діапазону параметрів сталевих конструкцій з одношаровою системою вогнезахисту визначали дані щодо проміжку часу ($t_{fr,10}$

або $t_{fr,40}$), за якого розрахункова температура сталевих конструкцій $\theta_{a,cal}$ з коефіцієнтом поперечного перерізу A_p/V дорівнює коригованій критичній температурі $\theta_{cr,c}$, значення якої наведено в табл. 12, для умов, що початкова температура цієї конструкції дорівнює її мінімально допустимому значенню $\theta_{0,min} = 10$ °C або максимально допустимому значенню $\theta_{0,max} = 40$ °C. За отриманими даними щодо проміжків часу $t_{fr,10}$ і $t_{fr,40}$ та формулами (3) і (4) визначали різниці $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$, значення яких вказано в табл. 14, 15.

Таблиця 14 – Дані щодо різниці $\delta_{t,10}$, визначені із застосуванням температури $\theta_{cr,c}$

A_p/V , м ⁻¹	λ_p , Вт/(м·°C)	Різниця $\delta_{t,10}$ (у %) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,max}$
40	0,02	0,67	0,67	—	0,00	-0,11	0,11	-0,21	0,00	0,04
150	0,02	0,00	0,00	0,00	0,22	0,11	-0,11	0,33	0,33	-0,21
300	0,02	0,00	0,00	0,00	0,22	0,11	0,11	0,13	0,08	0,17
40	0,2	0,00	0,00	—	0,22	0,89	0,00	0,00	-0,04	0,13
150	0,2	0,00	0,00	0,00	0,11	0,22	0,00	0,04	0,13	-0,13
300	0,2	0,00	-0,33	0,00	0,11	0,22	0,11	0,58	0,13	-0,04
40	2,0	-0,33	0,00	—	0,67	0,11	0,11	0,04	0,08	0,13
150	2,0	0,00	0,00	0,00	0,33	-0,11	-0,22	0,33	0,33	0,33
300	2,0	0,00	0,00	0,00	0,56	0,56	0,11	0,38	0,21	0,08

Таблиця 15 – Дані щодо різниці $\delta_{t,40}$, визначені із застосуванням температури $\theta_{cr,c}$

A_p/V , м ⁻¹	λ_p , Вт/(м·°C)	Різниця $\delta_{t,40}$ (у %) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,max}$
40	0,02	0,67	0,67	—	-0,33	-0,33	0,00	-0,04	0,13	0,29
150	0,02	0,00	0,33	0,00	-0,11	0,00	-0,22	0,33	0,38	0,04
300	0,02	0,00	0,33	0,00	-0,11	0,00	0,00	0,00	-0,04	0,33
40	0,2	0,00	0,00	—	-0,11	0,78	-0,22	0,04	0,04	0,38
150	0,2	0,00	0,00	0,00	-0,33	-0,11	0,00	-0,21	-0,08	-0,08
300	0,2	0,00	-0,33	0,00	-0,44	-0,11	-0,11	0,21	-0,25	-0,21
40	2,0	-0,67	-0,33	—	0,22	-0,22	-0,11	-0,21	-0,08	0,21
150	2,0	-0,33	0,00	0,00	-0,33	-0,44	-0,56	-0,21	-0,33	-0,04
300	2,0	-0,33	-0,33	0,00	-0,44	-0,11	-0,44	-0,29	-0,42	-0,46

Із аналізу даних, наведених у табл. 14, 15, випливає, що значення різниць $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$ змінюється: від $-0,33\%$ до $0,89\%$ – для $t_{fr,10}$, від $-0,67\%$ до $0,78\%$ – для $t_{fr,40}$. Середнє значення для різниці $\delta_{t,10}$ складає $0,11\%$, а для $\delta_{t,40}$ $-0,07\%$. Їхні стандартні відхилення (S_{10} і S_{40}) становлять $0,22\%$ і $0,27\%$ відповідно для $\delta_{t,10}$ і $\delta_{t,40}$. Зазначені розрахункові дані свідчать про те, що визначення проміжку часу, виконане

із застосуванням формули (5), рівняння (8) і коефіцієнтів регресії, наведених у табл. 13, призвело до усунення впливу неоднаковості початкової температури сталевих конструкцій на результати визначення проміжку часу збереженості їхньої вогнестійкості. Відхил розрахункового проміжку часу збереженості вогнестійкості, визначеного за мінімально і максимально допустимих

значень початкової температури сталевих конструкцій, від проміжку часу за номінальної початкової температури не перевищує 0,89%, що є прийнятною точністю для інженерних розрахунків.

Варто зауважити, що результати, отримані в межах цього дослідження, можуть вважатися за доцільні з практичного погляду, тому що дають змогу обґрунтовано підходити до визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості несучих сталевих конструкцій з різною початковою температурою. Під час цього визначення за результатами випробування сталевих конструкцій на вогнестійкість встановлюють проміжок часу до досягнення критичної температури θ_{cr} , розраховують різницю Δ (за рівнянням (8)) і кориговану критичну температуру $\theta_{cr,c}$ (за формулою (5)) та визначають проміжок часу до досягнення цієї коригованої температури, який приймають за проміжок часу збереженості вогнестійкості. З погляду теорії, отримані результати зазначеного дослідження дають змогу стверджувати про виявлення впливу початкової температури таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту, на проміжок часу збереженості їхньої вогнестійкості, для широких діапазонів параметрів цих конструкцій (теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, товщини вогнезахисту, критичної температури і коефіцієнта поперечного перерізу конструкції) і обґрунтування температурного показника для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості цих конструкцій за несучою здатністю, що є певними перевагами проведеного дослідження. Однак слід зауважити, що результати дослідження отримано для вогнезахисного покриття, що має сталі, незалежні від температури, значення коефіцієнта теплопровідності й питомої об'ємної теплоємності. Насправді, значення цих теплофізичних властивостей для пасивних і реактивних вогнезахисних матеріалів залежать від низки параметрів, зокрема від температури [27]. Крім того,

результати дослідження отримано тільки для одношарової системи вогнезахисту і тільки для стандартного температурного режиму. Зазначене може призвести до наявності відмінностей в отриманих результатах стосовно залежності різниці між коригованою і нормованою критичною температурами та параметрами сталевих конструкцій. Така невизначеність накладає певні обмеження на використання отриманих результатів, що може трактуватися, як недоліки цього дослідження. Неможливість зняти вказані обмеження в межах цієї розвідки зумовлює потенційно цікавий напрям подальших досліджень. Вони, зокрема, можуть бути орієнтовані на виявлення впливу початкової температури на показники щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій, оснащених одно- і багатошаровими системами вогнезахисту, в яких застосовують вогнезахисні покриття зі змінними теплофізичними властивостями, для умов вогневого впливу за різними номінальними температурними режимами. Це дасть змогу підвищити точність визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій будь-якого конструктивного виконання для різних умов їхнього застосування.

Висновки та напрями подальших досліджень. Під час проведення дослідження виявлено закономірності впливу початкової температури таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту, на проміжок часу збереженості їхньої вогнестійкості, для широких діапазонів параметрів цих конструкцій (теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, товщини вогнезахисту, критичної температури і коефіцієнта поперечного перерізу конструкції) і обґрунтовано температурний показник для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості цих конструкцій за несучою здатністю.

Встановлено, що для застосованого під час розрахунків діапазону параметрів сталевих конструкцій різниця між

значеннями проміжку часу до досягнення нормованої критичної температури, отриманими за мінімально допустимої початкової температури 10 °C і номінальної початкової температури 20 °C, може досягати 2,33%, а різниця між значеннями, отриманими за максимально допустимої початкової температури 40 °C, – 3,67%.

З'ясовано, що застосування як показника для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій коригованої критичної температури, розрахованої за формулою (2), призводить до збільшення похибки визначення цього проміжку часу щодо показника із досягнення нормованої критичної температури (максимальна величина похибки збільшується з 3,67% до 9,67%). З огляду на це застосування цього показника є неприйнятним.

Встановлено, що для визначення значення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій, яке є найбільш наближеним до номінального значення, необхідне застосування показника, яким є проміжок часу до

досягнення коригованої критичної температури, яку визначають за формулою (5). Визначено залежність різниці між цією коригованою критичною температурою і нормованою критичною температурою від параметрів сталевих конструкцій. Показано, що у разі застосування цього показника відхил розрахункового проміжку часу збереженості вогнестійкості, визначеного за мінімально і максимально допустимих значень початкової температури сталевих конструкцій, від проміжку часу за номінальної початкової температури не перевищує 0,89%, що є прийнятною точністю для інженерних розрахунків.

Окреслено напрями подальших досліджень, які орієнтовані на виявлення впливу початкової температури на показники щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій, оснащених одно- і багатошаровими системами вогнезахисту, в яких застосовують вогнезахисні покриття зі змінними теплофізичними властивостями, для умов вогневого впливу за різними номінальними температурними режимами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3 : Design of steel structures. Part 1–2 : General rules – Structural fire design. European committee for standardization. Management Centre : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2005 CEN. 78 p.
2. Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість : ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 [Чинний з 01.04.2017]. Київ : Мінрегіон України, 2016. 111 с.
3. EN 13381-4:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 4 : Applied passive protection to steel members. European committee for standardization. Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 83 p.
4. EN 13381-6:2012 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 6 : Applied protection to concrete filled hollow steel columns. European committee for standardization. Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2012 CEN. 24 p.
5. EN 13381-8:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 8 : Applied reactive protection to steel members. European committee for standardization. Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 76 p.
6. EN 13381-9:2015 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 9 : Applied fire protection systems to steel beams with web openings. European committee for standardization. CEN-CENELEC Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 40 p.
7. EN 13381-10:2020 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 10 : Applied protection to solid steel bars in tension. European committee for standardization. CEN-CENELEC Management Centre : Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2020 CEN. 31 p.
8. EN 13381-1:2014 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 1 : Horizontal protective membranes. European committee for standardization. CEN-CENELEC Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2014 CEN. 47 p.
9. EN 13381-2:2014 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 2 : Vertical protective membranes. European committee for standardization. CEN-CENELEC Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2014 CEN. 35 p.
10. EN 16623:2015 Paints and varnishes – Reactive coatings for fire protection of metallic substrates – Definitions, requirements, characteristics and marking. CEN-CENELEC Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2015 CEN. 42 p.
11. EN 1363-1:2020. Fire resistance tests. Part 1 : General Requirements. European committee for standardization. CEN-CENELEC Management Centre : Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2020 CEN. 54 p.
12. Egle Rackauskaite, Panagiotis Kotsovinos, Ann Jeffers, Guillermo Rein. Computational analysis of thermal and structural failure criteria of a multi-storey steel frame exposed to fire. *Engineering Structures*. 2019. Vol. 180. P. 524–543.

13. Kuo-Chen Yang, Hung-Hsin Lee, Olen Chan. Experimental study of fire-resistant steel H-columns at elevated temperature. *Journal of Constructional Steel Research*. 2006. Vol. 62. P. 544–553.
14. Shenggang Fan, Liyuan Zhang, Wenjun Sun, Xiaofeng Ding, Meijing Liu. Numerical investigation on fire resistance of stainless steel columns with square hollow section under axial compression. *Thin-Walled Structures*. 2016. Vol. 98. P. 185–195.
15. Anil Agarwal, Lisa Choe, Amit H. Varma. Fire design of steel columns : Effects of thermal gradients. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 93. P. 107–118.
16. Harbi Daud, Sultan A Daud, Adel A. Al-Azzawi. Thermal Behavior of Hollow and Solid Steel Beams with Different Boundary Conditions. *CAMES*. 2021. Vol. 28(3). P. 171–191.
17. Élio Maia, Carlos Couto, Paulo Vila Real, Nuno Lopes. Critical temperatures of class 4 cross-sections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2016. Vol. 121. P. 370–382.
18. Chao Zhang, Lisa Choe, Mina Seif, Zhe Zhang. Behavior of axially loaded steel short columns subjected to a localized fire. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015. Vol. 111. P. 103–111.
19. Jingjie Yang, Weiyong Wang, Yu Shi, Lei Xu. Experimental study on fire resistance of cold-formed steel built-up box columns. *Thin-Walled Structures*. 2020. Vol. 147. P. 106564.
20. Luis Laim, Hélder D. Craveiro, Rui Simões, André Escuder, Alexandre Mota. Experimental analysis of cold-formed steel columns with intermediate and edge stiffeners in fire. *Thin-Walled Structures*. 2020. Vol. 146. P. 106481.
21. I. Cabrita Neves. The critical temperature of steel columns with restrained thermal elongation. *Fire Safety Journal*. 1995. Vol. 24. P. 211–227.
22. J. P. Correia Rodrigues, I. Cabrita Neves, J. C. Valente. Experimental research on the critical temperature of compressed steel elements with restrained thermal elongation. *Fire Safety Journal*. 2000. Vol. 35. P. 77–98.
23. Peijun Wang, Yong-Chang Wang, Guo-Qiang Li. A new design method for calculating critical temperatures of restrained steel column in fire. *Fire Safety Journal*. 2010. Vol. 45. P. 349–360.
24. Tian-Yi Song, Wen-Chuan Yu, Kai Xiang, Hong-Yuan Zhou. Critical temperatures of concrete-filled steel tubular columns for early-warning of fire-induced failure. *Journal of Constructional Steel Research*. 2022. Vol. 191. P. 107190.
25. Новак С., Дріжд В., Добростан О., Новак М. Вплив теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів на тепловий стан сталевих колон за стандартного температурного режиму. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 1(13). С. 88–110.
26. EN 1991-1-2:2002. Eurocode 1 : Actions on structures. Part 1–2 : General actions – Actions on structures exposed to fire. European committee for standardization. Management Centre : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2002 CEN. 59 p.
27. Круковский П., Новак С., Поклонский В., Еременко С., Фролов Г. *Оценка огнестойкости металлических строительных конструкций и огнезащитной способности покрытий (расчетно-экспериментальный подход)* : коллективная монография. Киев : Франко Пак, 2021. 148 с.

REFERENCES

1. EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design. European committee for standardization. Management Centre: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2005 CEN. 78 p. [in English].
2. *Proektuvannia stalevykh konstrukttsii. Rozrakhunok konstrukttsii na vohnestiikist* [Design of steel structures. Calculation of structures for fire resistance]. (2016). DSTU-N B V.2.6-211:2016 from 1st april 2017. Kyiv: Minrehion Ukrainy [in Ukrainian].
3. EN 13381-4:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 4: Applied passive protection to steel members. European committee for standardization. Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 83 p. [in English].
4. EN 13381-6:2012 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 6: Applied protection to concrete filled hollow steel columns. European committee for standardization. Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2012 CEN. 24 p. [in English].
5. EN 13381-8:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 8: Applied reactive protection to steel members. European committee for standardization. Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 76 p. [in English].
6. EN 13381-9:2015 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 9: Applied fire protection systems to steel beams with web openings. European committee for standardization. CEN-CENELEC Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 40 p. [in English].
7. EN 13381-10:2020 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 10: Applied protection to solid steel bars in tension. European committee for standardization. CEN-CENELEC Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2020 CEN. 31 p. [in English].
8. EN 13381-1:2014 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 1: Horizontal protective membranes. European committee for standardization. CEN-CENELEC Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2014 CEN. 47 p. [in English].
9. EN 13381-2:2014 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 2: Vertical protective membranes. European committee for standardization. CEN-CENELEC Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2014 CEN. 35 p. [in English].
10. EN 16623:2015 Paints and varnishes – Reactive coatings for fire protection of metallic substrates – Definitions, requirements, characteristics and marking. CEN-CENELEC Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2015 CEN. 42 p. [in English].
11. EN 1363-1:2020. Fire resistance tests. Part 1: General Requirements. European committee for standardization. CEN-CENELEC Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2020 CEN. 54 p. [in English].
12. Egle, Rackauskaite, Panagiotis, Kotsovinos, Ann, Jeffers, Guillermo, Rein. Computational analysis of thermal and structural failure criteria of a multi-storey steel frame exposed to fire. *Engineering Structures*. 2019. Vol. 180. P. 524–543. [in English].
13. Kuo-Chen, Yang, Hung-Hsin, Lee, Olen, Chan. Experimental study of fire-resistant steel H-columns at elevated temperature. *Journal of Constructional Steel Research*. 2006. Vol. 62. P. 544–553. [in English].
14. Shenggang, Fan, Liyuan, Zhang, Wenjun, Sun, Xiaofeng, Ding, Meijing, Liu. Numerical investigation on fire resistance of stainless steel columns with square hollow section under axial compression. *Thin-Walled Structures*. 2016. Vol. 98. P. 185–195. [in English].
15. Anil, Agarwal, Lisa, Choe, Amit H., Varma. Fire design of steel columns: Effects of thermal gradients. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 93. P. 107–118. [in English].
16. Harbi, Daud, Sultan, A Daud, Adel A., Al-Azzawi. Thermal Behavior of Hollow and Solid Steel Beams with Different Boundary Conditions. *CAMES*. 2021. Vol. 28(3). P. 171–191. [in English].

17. Élio, Maia, Carlos, Couto, Paulo, Vila Real, Nuno, Lopes. Critical temperatures of class 4 cross-sections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2016. Vol. 121. P. 370–382. [in English].
18. Chao, Zhang, Lisa, Choe, Mina, Seif, Zhe, Zhang. Behavior of axially loaded steel short columns subjected to a localized fire. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015. Vol. 111. P. 103–111. [in English].
19. Jingjie, Yang, Weiyong, Wang, Yu, Shi, Lei, Xu. Experimental study on fire resistance of cold-formed steel built-up box columns. *Thin-Walled Structures*. 2020. Vol. 147. P. 106564. [in English].
20. Luis, Laím, Hélder, D. Craveiro, Rui, Simões, André, Escuder, Alexandre, Mota. Experimental analysis of cold-formed steel columns with intermediate and edge stiffeners in fire. *Thin-Walled Structures*. 2020. Vol. 146. P. 106481. [in English].
21. I. Cabrita, Neves. The critical temperature of steel columns with restrained thermal elongation. *Fire Safety Journal*. 1995. Vol. 24. P. 211–227. [in English].
22. J. P., Correia, Rodrigues, I. Cabrita, Neves, J. C., Valente. Experimental research on the critical temperature of compressed steel elements with restrained thermal elongation. *Fire Safety Journal*. 2000. Vol. 35. P. 77–98. [in English].
23. Peijun, Wang, Yong-Chang, Wang, Guo-Qiang, Li. A new design method for calculating critical temperatures of restrained steel column in fire. *Fire Safety Journal*. 2010. Vol. 45. P. 349–360. [in English].
24. Tian-Yi, Song, Wen-Chuan, Yu, Kai, Xiang, Hong-Yuan Zhou. Critical temperatures of concrete-filled steel tubular columns for early-warning of fire-induced failure. *Journal of Constructional Steel Research*. 2022. Vol. 191. P. 107190. [in English].
25. Novak, S., Dridzh, V., Dobrostan, O., Novak, M. (2022). Vplyv teplofizychnykh vlastyvostei vohnezakhysnykh materialiv na teplovyy stan stalevykh kolon za standartnoho temperaturnoho rezhymu [Influence of thermophysical characteristics of fire-retardant materials on the thermal state of steel columns under standard temperature regime]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhazhna bezpeka*. 1 (13), 88–110. [in Ukrainian].
26. EN 1991-1-2:2002. Eurocode 1: Actions on structures. Part 1–2: General actions – Actions on structures exposed to fire. European committee for standardization. Management Centre: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2002 CEN. 59 p. [in English].
27. Krukovskij P., Novak S., Poklonskij V., Eremenko S., Frolov G. Otsenka ognestojkosti metallicheskich stroitel'ny'kh konstrukcij i ognезashhitnoj sposobnosti pokry'tij (raschetno-e'ksperimental'ny'j podkhod) [Evaluation of the fire resistance of metal construction structures and the fire protection ability of the coated (calculation-experimental approach)]: *kollektivnaya monografiya*. Kiev: Izdatel'stvo Franko Pak, 2021. 148 s. [in Russian].

DETERMINATION OF THE TIME PERIOD OF PRESERVATION OF FIRE RESISTANCE OF LOAD-BEARING STEEL STRUCTURES WITH DIFFERENT INITIAL TEMPERATURES

S. Novak¹, O. Dobrostan¹, M. Pustovy²

¹*Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine*

²*Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chornobyl of the National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine*

KEYWORDS

thermal conductivity, critical temperature, initial temperature, time period of preservation of fire resistance, steel structures, temperature–time curve, thermophysical properties

ANNOTATION

This study is devoted to the determination of the time interval of preservation of fire resistance of load-bearing steel structures without an enclosing function, which have different initial temperatures during the test. It aimed to identify the influence of the initial temperature of steel structures such as beams and columns with a single-layer fire protection system on the time period of their fire resistance preservation, for a wide range of parameters of these structures (thermophysical properties of the applicable fire protection material, fire protection thickness, critical temperature and cross-section coefficient structures) and substantiation of the temperature indicator for determining the time interval of preservation of the fire resistance of these structures according to the bearing capacity. It was found that for the range of parameters of the steel structure used in the calculations, the difference between the values of the time interval until the normalized critical temperature is reached, obtained at the minimum permissible initial temperature of 10 °C and the nominal initial temperature of 20 °C, can reach 2.33%, and the difference between the values, obtained at the maximum permissible initial temperature of 40 °C and nominal initial temperature of 20 °C, can reach 3.67%. It was established that in order to determine the value of the time interval of preservation of the fire resistance of the steel structure, which is the closest to the nominal value, it is necessary to use the indicator, which is the time interval until the corrected critical temperature is reached. The dependence of the difference between this corrected critical temperature and the normalized critical temperature on the parameters of the steel structure was determined. It is shown that in the case of applying this indicator, the deviation of the calculated interval of time of preservation of fire resistance, determined for the minimum and maximum permissible values of the initial temperature of the steel structure, from the interval of time at the nominal initial temperature does not exceed 0.89%, which is an acceptable accuracy for engineering calculations.