

УДК 614.841.332

DOI: <https://doi.org/10.52363/2524-2636.2025.9.1.5>

Андрій КОВАЛЬОВ, д-р техн. наук, с.н.с. (ORCID: 0000-0002-6525-7558)

Роман ПУРДЕНКО (ORCID: 0000-0001-6467-4133)

Національний університет цивільного захисту України

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

У статті удосконалено математичну модель оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій шляхом урахування теплофізичних характеристик як сталевих елементів, так і вогнезахисних покриттів. Вперше виявлені закономірності впливу товщини, коефіцієнту теплопровідності та густини вогнезахисного покриття на значення межі вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій, в якості якої виступав час, за допомогою методу планування багатофакторного експерименту.

Розроблено розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій.

Розроблено керуючий алгоритм та процедуру реалізації розробленого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій, який засновано на експериментальних (блок випробування) та розрахункових (блок моделювання) процедурах. Експериментальна частина дослідження передбачає проведення вогневих випробувань як на повномасштабних сталевих конструкціях, так і на зразках зменшених розмірів, з урахуванням обраного проєктного сценарію пожежі. Розрахункова частина включає побудову математичної моделі, скінчено-елементної моделі, моделювання процесу (теплотехнічний та статичний аналізи) та виконання умов забезпечення вогнестійкості конструкцій.

Розроблено комп'ютерну модель для аналізу теплового стану вогнезахисної сталевий балки. Верифікація результатів засвідчила достатній рівень точності моделювання: максимальне відхилення розрахункових температур від експериментальних даних зафіксовано на 40-й хвилині впливу стандартного температурного режиму пожежі і складало 13 °C, що відповідає відносній похибці, яка не перевищує 3,1 %.

Ключові слова: вогнестійкість, реактивне вогнезахисне покриття, критична температура, сталеві конструкції.

Постановка проблеми. Щороку в світі фіксується приблизно 8 мільйонів пожеж, внаслідок яких гине до 100 тисяч осіб. Така статистика зумовлює необхідність як підвищення оперативної готовності аварійно-рятувальних підрозділів до реагування на надзвичайні ситуації, так і впровадження ефективних превентивних заходів, спрямованих на запобігання виникнення пожеж або мінімізацію їх наслідків. Незважаючи на те, що сучасні будівельні конструкції, спроектовані та виготовлені відповідно до нормативних вимог, розраховані на багаторічну експлуатацію, під дією пожежної навантаги вони можуть зазнати істотного руйнування вже через кілька годин або навіть хвилин після початку пожежі. Ще більшої актуальності це питання набуває у зв'язку зі змінами у світовому безпековому середовищі під час повномасштабного вторгнення російської федерації на територію нашої держави, яка з 2014 року переживає безперервне знищення об'єктів цивільної та соціальної інфраструктури, а також житлового фонду. В умовах повоєнної відбудови об'єктів критичної інфраструктури та інших об'єктів після поновлення будівництва таких об'єктів та розробки нових проєктів на будівництво виникатимуть питання, пов'язані з потребою у підвищенні меж вогнестійкості будівельних конструкцій до нормованих значень, а також захисту

наявних конструкцій від впливу вогню. Завдання забезпечення нормативних меж вогнестійкості будівельних конструкцій, зокрема сталевих конструкцій із вогнезахисними покриттями, є надзвичайно актуальним у контексті сучасних вимог пожежної безпеки. Розв'язання цієї науково-технічної проблеми сприятиме підвищенню рівня пожежної безпеки будівель та споруд, а також забезпечить методологічну основу для точного та обґрунтованого оцінювання мтж вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій з урахуванням різних умов експлуатації та типів пожежної навантаги. А це, своєю чергою, позитивним чином вплине на основні показники пожежної статистики.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Забезпечення вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій із вогнезахисним покриттям формує теоретичну основу для підвищення рівня пожежної безпеки будівельних об'єктів шляхом впровадження технічно обґрунтованих параметрів вогнезахисту, що базуються на комплексному аналізі теплофізичних властивостей матеріалів та особливостей теплопереносу в умовах пожежі. Зазначена проблема є складним міждисциплінарним завданням, розв'язання якого дозволить на стадіях проєктування, зведення та експлуатації будівель та споруд застосовувати вогнезахисні конструкції, здатні забезпечити стійкість об'єкту до високотемпературного та механічного впливу в умовах пожежі.

Проблематика експериментального та розрахункового оцінювання вогнестійкості незахищених та вогнезахисних сталевих будівельних конструкцій стала предметом чисельних наукових досліджень, проведених як вітчизняними, так і зарубіжними вченими.

У [1] запропоновано застосування програмного забезпечення SAFIR для побудови скінченно-елементної моделі, що дозволяє здійснювати чисельне моделювання поведінки будівельних конструкцій під час пожежі. Водночас, слід зауважити, що в межах зазначеного дослідження не було приділено достатньої уваги моделюванню теплового та напружено-деформованого стану сталевих конструкцій із вогнезахисними покриттями. Це, ймовірно, зумовлено складністю реалізації геометрії вогнезахисного покриття, а також труднощами, пов'язаними з точним визначенням та задаванням його теплофізичних та механічних характеристик у чисельній постановці.

В [2] представлено результати експериментальних досліджень сталевих пластин різної товщини, покритих вогнезахисним матеріалом на водній основі, з метою вивчення теплофізичних властивостей покриття та встановлення залежностей між температурним режимом і товщиною захисного шару. Однак, представлене дослідження не охоплює комплексного аналізу вогнестійкості сталевих конструкцій в цілому, зокрема з урахуванням впливу вогнезахисних покриттів на несучу здатність у високотемпературних умовах, що залишає це питання відкритим для подальших досліджень.

В [3 – 5] зазначено, що методики визначення мінімально необхідної товщини вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій регламентовані як європейськими, так і національними нормативними документами виключно для умов теплового впливу, що відповідає стандартному температурному режиму пожежі. Водночас процедура оцінювання мінімально необхідної товщини вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій за умов дії вуглеводневого та інших альтернативних температурних режимів пожежі на теперішній час залишається неурегульованою. Невизначеними також залишаються питання, пов'язані із формуванням залежностей для обґрунтування необхідної товщини вогнезахисту при тепловому впливі, що не відповідає стандартному (номінальному) температурному режиму, а також з відсутністю узагальнених даних щодо кореляції між значеннями товщин вогнезахисних покриттів, визначеними для різних сценаріїв впливу пожежі.

Таким чином, недостатньо висвітленими залишаються питання, пов'язані з науковим обґрунтуванням критичної температури сталі, що є необхідною умовою для коректного проєктування сталевих конструкцій із вогнезахисним покриттям. Це факт потребує подальших досліджень, виходячи з того, що компоненти математичної моделі повинні відображати основні фізичні процеси, що безпосередньо впливають на точність оцінювання вогнестійкості конструкції, зокрема необхідну просторовість розподілу температури,

напруження та неоднорідність будівельної конструкції за структурою та фізичними властивостями її окремих елементів. Критерієм достовірності результатів розрахункового оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій має виступати їх відповідність експериментальним даним, які отримано під час вогневих випробувань. Така відповідність, у свою чергу, визначається повнотою врахування основних фізичних процесів у розроблених або обраних фізичних та математичних моделях, коректністю задавання теплофізичних та механічних параметрів, а також чисельною точністю інтегрування систем рівнянь, що описують поведінку конструкцій у високотемпературному середовищі.

Постановка задачі та її розв'язання. Метою даної роботи було удосконалення математичної моделі та на її основі розробка методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- удосконалити математичну модель оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій;
- розробити розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій;
- розробити комп'ютерну модель аналізу теплового стану вогнезахищеної сталеві балки в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» та перевірити її адекватність.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Для побудови математичної моделі використали структурно-логічну схему, що подана на рис. 1 [6].

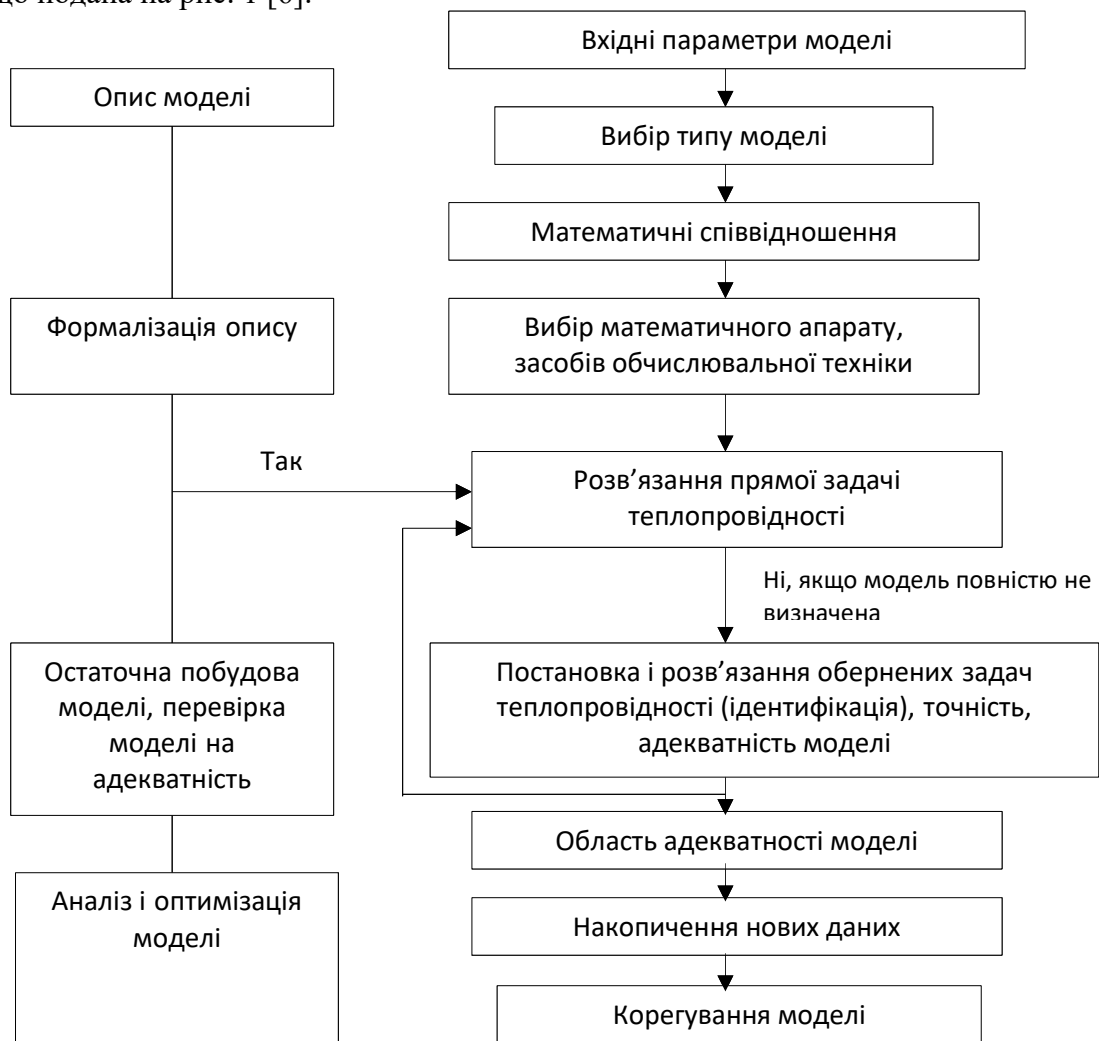


Рисунок 1 – Структурно-логічна схема побудови математичної моделі

Згідно обраної структурно-логічної схеми рис. 1, була удосконалена математична

модель для оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій, яка включає в себе врахування таких чинників: температурних режимів пожежі, теплофізичних характеристик поверхні, що захищається, вогнезахисних покриттів, кліматичних факторів [7]. Суть удосконалення моделі полягала у доповненні вже відомих рівнянь нестационарної теплопровідності рівнянням регресії для визначення межі вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій методом планування багатофакторного експерименту. Особливістю розробленої математичної моделі є той факт, що межа вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій, в якості якої виступав час, що відповідає нормованій межі вогнестійкості $t_{fi,requ}$ з урахуванням товщини, коефіцієнту теплопровідності та густини покриття в останньому визначався за емпіричним рівнянням. Для уточнення діапазону технологічних та теплофізичних параметрів покриття (товщини, коефіцієнту теплопровідності та густину), за яких досягаються найраціональніші значення показників межі вогнестійкості, було використано метод планування багатофакторного експерименту.

За відгук обиралася межа вогнестійкості сталі ($t_{fi,requ}$, хв) за умови, що цей час прагне до максимуму. Незалежними змінними (факторами) були обрані такі величини: X_1 – товщина покриття (d_p), X_2 – коефіцієнт теплопровідності покриття (λ_p), X_3 – густина покриття (ρ_p) табл. 1.

Таблиця 1 – Експериментальні рівні варіювання

Фактори оптимізації	Кодоване значення факторів	Інтервал варіювання	Рівні факторів		
			Верхній R90	Основний R60	Нижній R30
Товщина покриття, d_p , мм	X_1	0,895	2	1,105	0,21
Коефіцієнт теплопровідності покриття, λ_p , мВт/(м·°С)	X_2	48,1	100	51,9	3,8
Густина покриття, ρ_p , кг/м ³	X_3	150	1400	1250	1100

Під час побудови рівняння регресії було забезпечено дотримання ключових вимог математичної статистики, зокрема: фізичної незалежності між вхідними та вихідними параметрами, нормальності розподілу випадкових похибок, стійкості експерименту до впливу зовнішніх збурень, а також послідовності виконання досліджень, яка не порушувала ортогональність плану експерименту.

В результаті складено план трьохфакторного експерименту, за яким використовуючи методи статистичного планування n -го порядку, математична модель була отримана у вигляді нелінійного рівняння регресії квадратичної форми для трьох факторів оптимізації.

Для виключення систематичної похибки досліди рандомізовано за допомогою таблиці випадкових чисел. На основному рівні проведено $m = 3$ паралельних експерименти у $n = 5$ повтореннях кожен (загальна кількість спостережень $N = 3 \cdot 5 = 15$), на основі яких встановлено число ступенів свободи ($k_0 = N - 1 = 4$ (для загальної суми квадратів відхилень); $k_1 = m - 1 = 2$ (для міжгрупової суми квадратів відхилень); $k_2 = m(n - 1) = 12$ (для внутрішньогрупової суми квадратів відхилень) дисперсію досліду при двох ступенях свободи $S_c^2 = 499,9$ та середнє квадратичне відхилення $\sigma_c = 22,358$.

За даними експерименту та з використанням методу планування багатофакторного експерименту розраховано коефіцієнти регресії (у кодованому масштабі):

$$\begin{aligned}
 b_0 &= 69,45 & b_{11} &= 0,01312 & b_{22} &= 0,0014 & b_{33} &= -0,000036 \\
 b_1 &= 0,448 & b_{12} &= -0,14 & b_{23} &= 0,000662 \\
 b_2 &= -0,000115 & b_{13} &= 0,00466 \\
 b_3 &= -0,000023
 \end{aligned}$$

Табличне значення t-критерію Стюдента при 15 дослідках та рівні значимості 0,05 складає 2,14. Отримана модель залежності відносної похибки проведення контролю від трьох визначених факторів має вигляд:

$$t_{fi,regu} = 69,45 + 0,448 \cdot d_p - 0,000115 \cdot \lambda_p - 0,000023 \cdot \rho + 0,01312 \cdot d_p^2 + 0,0014 \cdot \lambda_p^2 - 0,000036 \cdot \rho_p^2 - 0,14 \cdot d_p \cdot \lambda_p + 0,00466 \cdot d_p \cdot \rho + 0,000662 \cdot \lambda_p \cdot \rho. \quad (1)$$

В результаті дослідження вищенаведеного рівняння регресії були встановлені залежності нормованої межі вогнестійкості сталі ($t_{fi,requ}$) від коефіцієнту теплопровідності покриття (λ_p), густини покриття (ρ_p) за різних значень товщини покриття (d_p) рис. 2.

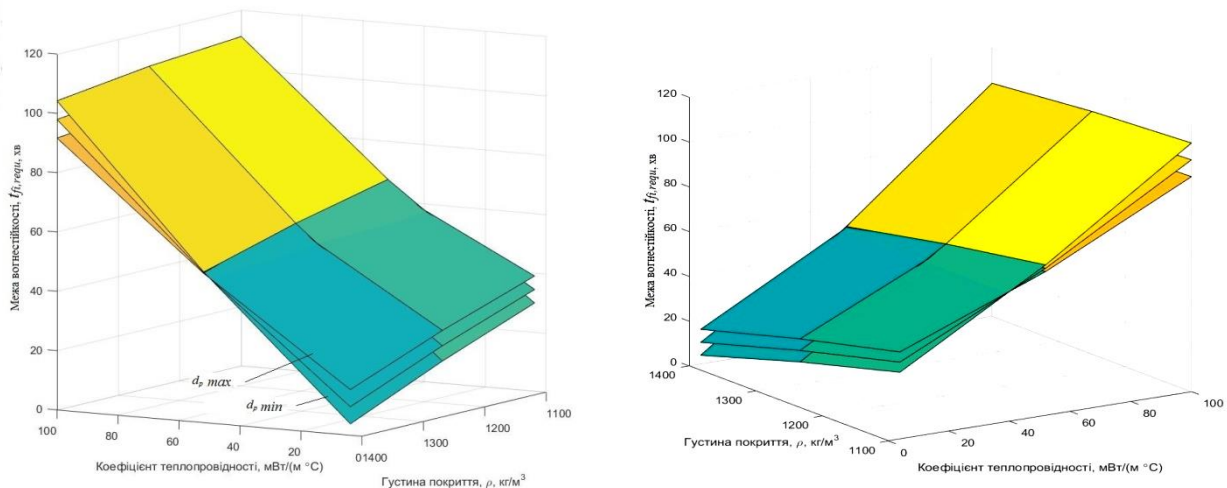


Рисунок 2 – Поверхні залежностей межі вогнестійкості вогнезахищеної сталевій конструкції від коефіцієнту теплопровідності покриття, густини покриття за різних значень товщини покриття

Як можна побачити із залежностей рис. 2, при значеннях товщини покриття, що прямує до мінімуму, при одночасному зменшенні густини від 1400 кг/м³ до 1250 кг/м³ і при постійному значенні коефіцієнту теплопровідності 3,8 мВт/(м·°C), значення межі вогнестійкості вогнезахищеної сталевій конструкції знаходяться за межами робочих параметрів. Вихід за рамки цього діапазону під час обрання робочих параметрів веде до недопустимих похибок при оцінюванні вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій.

При зменшенні товщини покриття менше 1,105 мм, з одночасним збільшенням його густини вище 1250 кг/м³ та теплопровідності вище 3,8 мВт/(м·°C), межа вогнестійкості сталі досягає мінімальних значень $t_{fi,requ} < 50$ хв. В той же час, збільшення товщини покриття більше 1,105 мм при одночасному зменшенні його густини та зменшенні теплопровідності веде до підвищення межі вогнестійкості сталі за найбільш раціональних режимів до 60 хвилин.

Таким чином, на основі проведеного експериментально-статистичного дослідження методом планування багатофакторного експерименту та аналізуючи отримані залежності (рис. 2), уточнено раціональні діапазони технологічних параметрів покриття (товщини, коефіцієнту теплопровідності та густину), за яких час вогнестійкості набуває найбільших значень.

На основі математичної моделі розроблено розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій, що передбачає такі етапи рис. 3:

1. Проведення вогневих випробувань вогнезахисних сталевих конструкцій або експериментальних досліджень з визначення температури на необігрітій поверхні масштабованих (зменшених) зразків за різних температурних сценаріїв пожежі (стандартної, вуглеводневої, зовнішньої, тунельної, реальної) [6].

2. Розробка або удосконалення математичних і фізичних моделей процесів, що відбуваються у досліджуваній вогнезахисній сталевій конструкції під час випробувань на вогнестійкість, за заданих температурних та експлуатаційних умов [7] та комп'ютерна реалізація розроблених моделей (комп'ютерна модель).

3. Визначення теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття, зокрема коефіцієнта теплопровідності та питомої об'ємної теплоємності, розв'язанням обернених завдань теплопровідності [8], з використанням експериментальних даних, отриманих під час вогневих випробувань (температурний режим у печі, температурні значення на поверхнях зразків досліджуваної конструкції).

4. Визначення залежності мінімальної товщини покриття від приведеної товщини сталеві конструкції, тривалості вогневого впливу та значення критичної температури сталі, шляхом розв'язання прямих задач теплопровідності [8].

Основу розробленого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій становить математична модель досліджуваного фізичного процесу, тоді як експериментальна складова виконує допоміжну функцію, забезпечуючи верифікацію та підтвердження адекватності обраної моделі. На рис. 3 наведено керуючий алгоритм та узагальнену процедуру реалізації методу, що ґрунтується на інтеграції експериментальних (блок випробування) та чисельно-розрахункових (блок моделювання) процедур. Експериментальна частина дослідження передбачає проведення вогневих випробувань як на повномасштабних сталевих конструкціях, так і на зразках зменшених розмірів, з урахуванням обраного проєктного сценарію пожежі. В рамках випробувань визначаються умови обпирання, тип вогнезахисного покриття (реактивного або пасивного типу), параметри навантаження, кількість і розташування термопар для контролю температурного поля, а також реєструються деформації об'єкту випробування. Розрахункова частина методу включає побудову математичної моделі фізичних процесів, а також скінченно-елементної моделі конструкції з урахуванням її геометричних параметрів, теплофізичних та механічних характеристик матеріалів. В межах цієї частини виконується моделювання теплового впливу (теплотехнічний аналіз) та подальший розрахунок напружено-деформованого стану (статичний аналіз) конструктивного елемента.

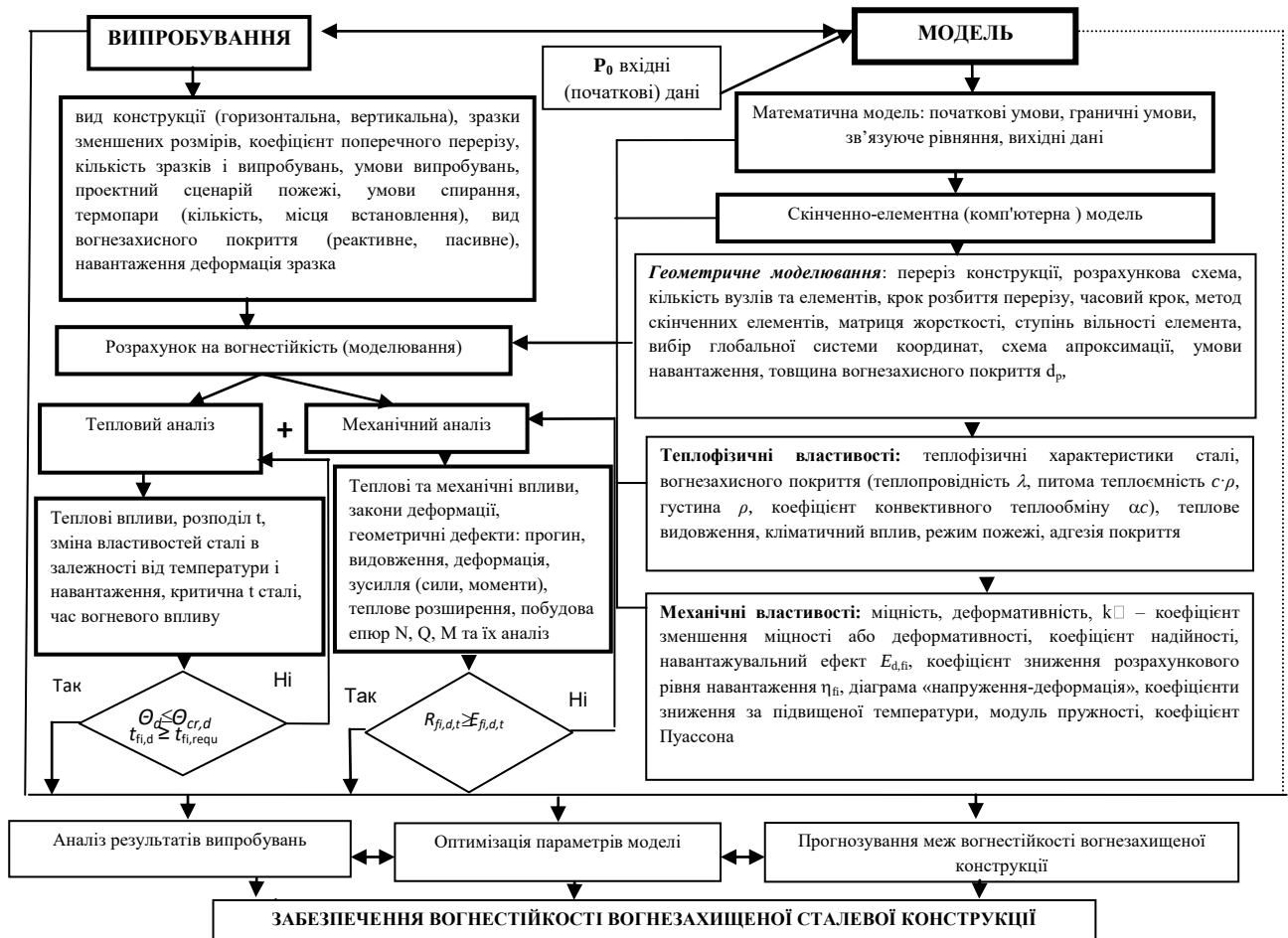


Рисунок 3 – Керуючий алгоритм та процедура реалізації розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій

Згідно вказаного алгоритму було проведено оцінку ефективності та процедуру реалізації методу при оцінюванні вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій, що представлено нижче.

Відповідно до розробленого керуючого алгоритму рис. 3, реалізовано процедуру оцінювання вогнестійкості сталеві балки без прикладеного механічного навантаження, захищеної вогнезахисним покриттям, з урахуванням експериментальних та чисельних складових розрахунково-експериментального підходу. Об'єктом випробування були дві сталеві балки ІРЕ 400 (приведена товщина 5,309 мм, коефіцієнт перерізу $Am/V=188,4 \text{ м}^{-1}$), довжиною по 1 м, які перед нанесенням вогнезахисної речовини були покриті шаром ґрунту ГФ-021 товщиною 0,05 мм. Товщина покриття для зразка балки № 1 складала 0,232 мм, для зразка балки № 2 – 1,183 мм. До нанесення покриття згідно до [9] на кожній короткій балці встановлювалися термопари ТХА для вимірювання температури вогнезахисених сталевих елементів у характерних точках, таких як полка, стінка та інші критичні зони, де очікується максимальне теплове навантаження. Підготовка зразків до випробувань і самі випробування на вогнестійкість проведені згідно процедур, описаних в [6-8].

Розрахункова частина керуючого алгоритму та процедура реалізації розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисених сталевих конструкцій була реалізована шляхом чисельного моделювання теплового впливу заданого температурного режиму пожежі на сталеву балку з вогнезахисним покриттям у програмному середовищі «ЛІРАСАПР».

Алгоритм розрахунку передбачав визначення температурного розподілу в кожному

вузлі перерізу розробленої скінченно-елементної моделі, що дозволило отримати просторовий розподіл теплового стану конструктивного елемента в умовах дії високотемпературного середовища. Розподіли температур у вогнезахищеній сталевій балці, отримані в результаті чисельного моделювання за умов дії стандартного температурного режиму пожежі, задовільно корелюють з експериментальними даними в межах допустимих відхилень, що підтверджує достовірність моделі рис. 4.

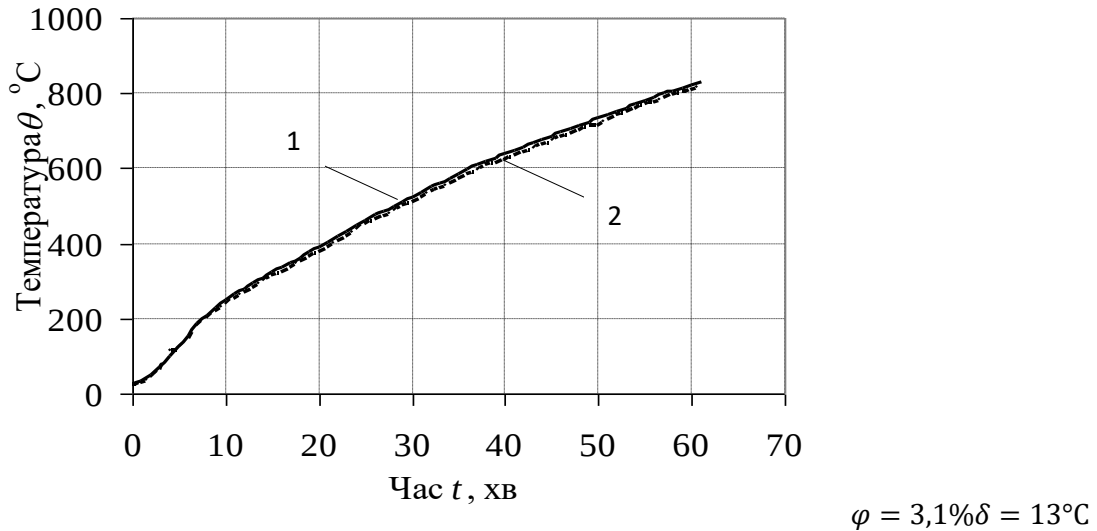


Рисунок 4 – Середня температура короткої вогнезахищеної сталевій балки: 1 – експеримент, 2 – розрахунок

Результати розрахунків рис. 4, задовільно корелюють з результатами експериментальних досліджень, що дозволяє з достатньою для інженерних розрахунків точністю оцінювати вогнестійкість вогнезахищених сталевих конструкцій, а саме балок двотаврового перерізу [6]. Підтвердженням цьому є дані табл. 2.

Таблиця 2 – Порівняння експериментальних та чисельних результатів

Час, хв.	Т сер., °C (експеримент)	ЛІРА-САПР, °C (розрахунок)	Відхилення, °C	Похибка, %
0	26	26	0	0
10	248	238	10	4,1
20	390	378	12	4
30	524	512	12	3,3
40	637	624	13	3,1
50	734	725	9	1,3
60	822	811	11	1,4

Як видно із табл. 2, найбільше відхилення температури від експериментальних значень спостерігалось на 40 хвилині розрахунку і становило 13 °C, що відповідає похибці не більше 3,1 %.

Розрахунки були виконані на ліцензованій комп'ютерній програмі, яку надано ТОВ «ЛІРА САПР» (Україна) (ліцензія № 1/8583 від 16.02.2022).

Висновки.

1. Удосконалено математичну модель оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій шляхом урахування теплофізичних характеристик як сталевих елементів, так і вогнезахисних покриттів. Вперше встановлено закономірності впливу основних параметрів вогнезахисту – товщини, коефіцієнта теплопровідності та густини покриття – на значення межі вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій, в якості якої виступав

час. Зазначені залежності отримано на основі методу планування багатфакторного експерименту у вигляді рівняння регресії:

$$t_{fi,regu} = 69,45 + 0,448 \cdot d_p - 0,000115 \cdot \lambda_p - 0,000023 \cdot \rho + 0,01312 \cdot d_p^2 + 0,0014 \cdot \lambda_p^2 - 0,000036 \cdot \rho^2 - 0,14 \cdot d_p \cdot \lambda_p + 0,00466 \cdot d_p \cdot \rho + 0,000662 \cdot \lambda_p \cdot \rho$$

2. Розроблено розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій. Експериментальна частина методу передбачає проведення вогневих випробувань як на повномасштабних сталевих конструкціях, так і на зразках зменшених розмірів, з урахуванням обраного проєктного сценарію пожежі. Розрахункова частина включає побудову математичної моделі фізичних процесів, а також скінченно-елементної моделі конструкції з урахуванням її геометричних параметрів, теплофізичних та механічних характеристик матеріалів, ідентифікацію теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття шляхом розв'язання обернених задач теплопровідності та визначення характеристики вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття шляхом розв'язання прямих задач теплопровідності.

3. Розроблено комп'ютерну модель для аналізу теплового стану вогнезахищеної сталеві балки в умовах пожежного впливу з використанням програмного комплексу «ЛІРА-САПР». У результаті проведеного дослідження встановлено, що розроблена комп'ютерна модель чисельного моделювання демонструє високу адекватність при оцінюванні вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій. Верифікація результатів засвідчила достатній рівень точності моделювання: максимальне відхилення розрахункових температур від експериментальних даних зафіксовано на 40-й хвилині впливу стандартного температурного режиму пожежі і складало 13 °С, що відповідає відносній похибці, яка не перевищує 3,1 %.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Franssen J. M., Gernay T. (2017). Modeling structures in fire with SAFIR®: Theoretical background and capabilities. *Journal of Structural Fire Engineering*, 8(3), 300–323. URL: <https://doi.org/10.1108/JSFE-07-2016-0010>.
2. Yew, M. C., & Ramli Sulong, N. H. (2012). Fire-resistive performance of intumescent flame-retardant coatings for steel. *Materials and Design*, 34, 719–724. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.05.032>.
3. Новак С., Дрідж 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.
4. Калафат К., Вахитова Л. Аналітичний огляд засобів вогнезахисту сталевих конструкцій 2019–2020: публікація. Український центр сталевих виробництва, 2020. 200 с.
5. Калафат К., Вахитова Л. Аналітичний огляд засобів вогнезахисту сталевих конструкцій 2021: публікація. Український центр сталевих виробництва, 2022. 230 с.
6. Ковальов А.І., Пурденко Р.Р., Отрош Ю.А., Томенко В.І., Качкар Є.В., Майборода Р.І. Оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих балок. *Вісті Донецького гірничого інституту*. Донецьк: ДВНЗ «ДНТУ». 2022. № 2 (51). С.43–53.
7. Ковальов А.І., Отрош Ю.А., Пурденко Р.Р., Томенко В.І. Дослідження вогнестійкості захищених реактивними вогнезахисними речовинами сталевих будівельних конструкцій. *Пожежна безпека*. Львів: ЛДУБЖД. 2022. № 41. С.57–66.
8. Sadkovyi, V., Andronov, V., Semkiv, O., Kovalov, A., Rybka, E., Otrosh, Yu. et. al. Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. *Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER*. 2021. 180 p.
9. 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. 80 p.

REFERENCES

1. Franssen J. M., Gernay T. (2017). Modeling structures in fire with SAFIR®: Theoretical background and capabilities. *Journal of Structural Fire Engineering*, 8(3), 300–323. URL: <https://doi.org/10.1108/JSFE-07-2016-0010>.
2. Yew, M. C., & Ramli Sulong, N. H. (2012). Fire-resistive performance of intumescent flame-retardant coatings for steel. *Materials and Design*, 34, 719–724. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.05.032>.
3. Novak S., Dridzh V., Dobrostan O., Novak M. Vplyv teplofizychnykh vlastyvostei vohnezakhysnykh materialiv na teplovyi stan stalevykh kolon za standartnoho temperaturnoho rezhymu. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2022. № 1 (13). S. 88–110.
4. Kalafat K., Vakhytova L. Analitychnyi ohliad zasobiv vohnezakhystu stalevykh konstrukttsii 2019–2020: publikatsiia. *Ukrainskyi tsentr stalevoho vyrobnytstva*, 2020. 200 s.
5. Kalafat K., Vakhytova L. Analitychnyi ohliad zasobiv vohnezakhystu stalevykh konstrukttsii 2021: publikatsiia. *Ukrainskyi tsentr stalevoho vyrobnytstva*, 2022. 230 s.
6. Kovalov A.I., Purdenko R.R., Otrosh Yu.A., Tomenko V.I., Kachkar Ye.V., Maiboroda R.I. Otsiniuvannia vohnestiikosti vohnezakhysnykh stalevykh balok. *Visti Donetskoho hirnychoho instytutu*. Donetsk: DVNZ «DNTU». 2022. № 2 (51). S.43–53.
7. Kovalov A.I., Otrosh Yu.A., Purdenko R.R., Tomenko V.I. Doslidzhennia vohnestiikosti zakhysnykh reaktyvnymy vohnezakhysnymy rehovynamy stalevykh budivelnykh konstrukttsii. *Pozhezhna bezpeka*. Lviv: LDUBZhD. 2022. № 41. S.57–66.
8. Sadkovyi, V., Andronov, V., Semkiv, O., Kovalov, A., Rybka, E., Otrosh, Yu. et. al. Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. *Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER*. 2021.
9. 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. 80 p.

Andrii KOVALOV, Doctor of Technical Sciences

Roman PURDENKO

National University of Civil Protection of Ukraine

CALCULATION-EXPERIMENTAL METHOD

ASSESSMENT OF FIRE RESISTANCE OF FIRE-PROTECTED STEEL STRUCTURES

The article improves the mathematical model for assessing the fire resistance of fire-protected steel structures by taking into account the thermophysical characteristics of fire-protective coatings. For the first time, the patterns of influence of the thickness, thermal conductivity coefficient and density of the fire-retardant coating on the value of the fire resistance limit of fire-protected steel structures were revealed, which was time, using the method of multifactorial experiment planning.

A computational and experimental method for assessing the fire resistance of fire-protected steel structures has been developed.

A control algorithm and procedure for implementing the developed computational-experimental method for assessing the fire resistance of fire-protected steel structures have been developed, which is based on experimental (test unit) and computational (modeling unit) procedures. The experimental part of the study involves conducting fire tests on both full-scale steel structures and reduced-size samples, taking into account the selected design fire scenario. The calculation part includes the construction of a mathematical model, a skin-element model, the modeling process (thermal and static analysis), and the fulfillment of the conditions for ensuring the fire resistance of the structure.

A computer model was developed to analyze the thermal state of a fire-protected steel beam.

Verification of the results showed a sufficient level of modeling accuracy: the maximum deviation of the calculated temperatures from the experimental data was recorded at the 40th minute of exposure to the standard fire temperature regime and was 13 °C, which corresponds to a relative error not exceeding 3.1%.

Key words: fire resistance, reactive fireproof coating, critical temperature, steel structures.