

Н. П. Заїка, ад'юнкт (ORCID 0000-0002-8757-5709)

Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ЗАКОНОМІРНОСТІ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ СТАЛЕВОЇ БАЛКИ З ВОГНЕЗАХИСТОМ З ГІПСОКАРТОНУ ВІД ЧАСУ ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ

Досліджено розподіл температури в сталевих балках з профілю НЕВ 200 з вогнезахистом у вигляді гіпсокартонних плит під впливом стандартного температурного режиму пожежі. Розрахунок проведено у програмному комплексі ANSYS WB для визначення залежності температури в сталевій конструкції від часу впливу пожежі. Модель дозволяє детально оцінити теплопередачу у матеріалах із різними теплофізичними характеристиками, зокрема змінною теплоємністю та теплопровідністю сталі й гіпсокартону. Використання гіпсокартону як вогнезахисного покриття обґрунтовано його здатністю уповільнювати нагрівання сталі. Такий підхід дозволяє значно підвищити вогнестійкість сталевих конструкцій, зберігаючи їхню механічну цілісність. Отримані результати показали, що максимальна температура в сталевій балці з гіпсокартонним вогнезахистом не перевищує 443 °C навіть при тривалості пожежного впливу у 60 хв, що припускає відповідність до класу вогнестійкості R60. Побудований графік залежності максимальної температури від часу впливу пожежі підтвердив ефективність вогнезахисту гіпсокартоном і високу точність апроксимації моделі (коефіцієнт детермінації $R^2=0,9923$), що свідчить про достовірність результатів. Запропонована модель та підхід можуть бути використані для оцінки вогнестійкості інших сталевих елементів конструкцій, зокрема для підбору оптимальних вогнезахисних матеріалів. Дослідження є актуальним у контексті розробки економічно вигідних і ефективних методів захисту будівельних конструкцій від впливу високих температур пожежі. Методика моделювання вогнезахисту в сталевих балках надає можливість визначення температурних режимів, що виникають у реальних умовах пожежі, та розробки рекомендацій щодо підвищення вогнестійкості сталевих конструкцій, особливо в сучасних будівлях, де важлива оптимізація матеріальних і ресурсних витрат.

Ключові слова: моделювання, стандартний температурний режим пожежі, питома теплоємність, теплопровідність, вогнезахист, гіпсокартон

1. Вступ

Сталеві будівельні конструкції відіграють ключову роль у сучасному будівництві, забезпечуючи високу міцність, гнучкість та стійкість до різноманітних навантажень. Завдяки своїм фізичним властивостям, сталеві матеріали дозволяють створювати легкі та витривалі конструкції, що є особливо важливими в умовах зростаючих вимог до енергоефективності та екологічності будівель.

Крім того, сталеві конструкції демонструють високу швидкість монтажу, що знижує витрати на будівництво та скорочує терміни реалізації проєктів. Інноваційні технології, такі як модульне будівництво, ще більше підвищують ефективність використання сталевих елементів, дозволяючи оптимізувати процеси проєктування та виготовлення.

Слід зауважити, що сталеві будівельні конструкції характеризуються тривалим терміном експлуатації що робить їх привабливими для комерційних, промислових та житлових проєктів. Однак вогнестійкість незахищених сталевих будівельних конструкцій при набутті критичної температури 700 °C майже втрачається, що загрожує здоров'ю та життю людей навіть на початкових стадіях пожежі. Таким чином, проведення досліджень щодо підвищення рівня вогнестійкості відповідальних конструктивних елементів, таких як сталеві балки є актуальним.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Вирішення цієї проблеми займалось багато дослідників. Так, наприклад, у Construction and Civil Engineering. DOI: 10.52363/2524-0226-2024-40-2

роботі [1] запропоновано підвищення вогнестійкості сталеві балки за допомогою вогнезахисного облицювання у вигляді мінераловати, однак такий вид облицювання може втрачати свою цілісність при високих температурах, що зменшує вогнестійкість конструкції. Крім того, мінеральна вата може втрачати форму або відшаровуватися під час пожежі, що також призводить до зниження вогнезахисної здатності сталевих конструкцій. У роботах [2, 3] описано використання вогнезахисної фанери як вогнезахисного способу облицювання для дерев'яних балок. Проведені дослідження у [2, 3] вказують на ефективність запропонованого способу вогнезахисту. Але при цьому виникає складність застосування такого виду вогнезахисту для сталевих балок під час технологічного процесу виготовлення вказаних листів вогнезахисної фанери. Крім того, визначення необхідного шару такого вогнезахисту для досягнення необхідного класу вогнестійкості для сталевих балок під час проведення моделювання потребує проведення додаткових досліджень з розв'язанням обернених теплових задач щодо визначення теплофізичних характеристик просоченої вогнезахисної фанери.

Під час досліджень із застосуванням математичного моделювання впливу стандартного температурного режиму пожежі на будівельні конструкції використовуються різні програмні комплекси. Важливим критерієм вибору програмного продукту для розрахунків є простота його використання. Так, наприклад, у [4] використовується програмне забезпечення SAFIR для розв'язання теплотехнічних задач. Цей програмний продукт, розроблений для чітко визначеної сфери застосування, є відносно простим у використанні. Однак у ньому виникають труднощі з моделюванням вогнезахисних конструкцій, зокрема, із правильним та точним задаванням параметрів вогнезахисних покриттів. Це обмеження робить SAFIR менш придатним для досліджень температурного розподілу у сталевих балках із вогнезахистом.

У [5] було розв'язано теплотехнічну задачу розподілу температури сталеві балки із вогнезахистом за допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР. Однак під час завдання теплофізичних параметрів вогнезахисного матеріалу в [5] було прийнято постійне значення питомої теплоємності, що дорівнює $70,4 \text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$, без урахування температурної залежності цього показника. Такий підхід не забезпечує достатньої точності розрахунків, оскільки теплоємність є важливим параметром, який значно впливає на розподіл температури в будь-яких конструкціях під час впливу пожежі.

Складнощі при моделюванні теплового впливу на сталеві конструкції з вогнезахистом виникають під час створення математичних моделей матеріалів, зокрема при визначенні теплофізичних характеристик вогнезахисних матеріалів, які необхідно задавати у їх властивостях. У [6, 7] детально описана методика розрахунку теплотехнічної задачі із зазначенням теплофізичних характеристик сталевих конструкцій. Проте, зважаючи на те, що сталеві конструкції серед кам'яних і дерев'яних мають найнижчу вогнестійкість і у 99,9 % випадків потребують вогнезахисту, у [6, 7] не наведено жодного вогнезахисного матеріалу із відповідними теплофізичними параметрами. Пасивні вогнезахисні матеріали, такі як штукатурки на основі цементу, глини та інших мінеральних сполук, а також вироби з мінеральних волокон, використовуються для захисту сталевих конструкцій від впливу високих температур [8, 9]. Ці матеріали відрізняються низькою вартістю нанесення та є економічно вигідними, хоча їх застосування обмежується певними типами складних форм та елементів, що поступаються в універсальності плитним систе-

мам [8, 9]. Основні недоліки полягають у тому, що такі матеріали не забезпечують естетичного вигляду, потребують нанесення у вологому стані та додаткового часу на висихання, що може затримати виконання інших робіт на об'єкті.

Тому було прийнято рішення використовувати у вигляді вогнезахисту сталеві балки гіпсокартонні плити, які виготовляються з вогнестійкого матеріалу, що містить воду у формі кристалічно зв'язаного гіпсу. Під час нагрівання ця вода випаровується, що поглинає тепло і допомагає затримувати підвищення температури на початкових етапах пожежі. Крім того, гіпсокартонні плити легко встановлюються і можуть бути закріплені на сталевих балках без потреби в складних конструкціях або спеціальних інструментах. На відміну від інших матеріалів, таких як бетон чи цегла, гіпсокартон легкий і не створює великого додаткового навантаження на конструкцію. Він також добре піддається обробці, що дозволяє адаптуватися до різних форм та розмірів балок. У порівнянні з багатьма іншими методами вогнезахисту, гіпсокартон є відносно недорогим рішенням, особливо якщо його можна використовувати разом з іншими захисними матеріалами.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є створення математичної моделі розподілу температури сталеві балки з вогнезахистом із гіпсокартону в умовах пожежі, яка б враховувала вплив температурно-залежних теплофізичних характеристик вогнезахисного матеріалу.

3. Мета та завдання дослідження

Мета роботи полягає у визначенні закономірностей розподілу температури у сталевій балці з двотаврового європейського профілю НЕВ 200 із вогнезахистом з залежності від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі. Це дозволить проводити оцінювання з вогнестійкості таких конструкцій із використанням вогнезахисту з плит гіпсокартону товщиною 20 мм.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

1. Створити розрахункову модель у програмному комплексі ANSYS WB для проведення розрахунку розподілу температури у фрагменті сталеві балки з двотаврового європейського профілю НЕВ 200 із влаштуванням вогнезахисту із гіпсокартону в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі.

2. За результатами проведеного розрахунку проаналізувати розподіл температури безпосередньо у фрагменті сталеві балки з двотаврового європейського профілю НЕВ 200 та встановити залежність розподілу максимальної температури по цій конструкції від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є сталеві балки двотаврового європейського профілю НЕВ 200 з вогнезахистом з гіпсокартону в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Предмет дослідження – закономірності розподілу температури у сталевих балках з вогнезахистом з гіпсокартону під час моделювання пожежі залежно від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Гіпотеза дослідження полягає у використанні гіпсокартонних плит для сталевих двотаврових балок як вогнезахисного покриття, що дозволяє знизити температуру таких будівельних конструкцій під час пожежі та сприяє підвищенню їхньої вогнестійкості.

Методи дослідження включали три основні етапи:

1) Розробка математичної моделі у програмному комплексі ANSYS WB для проведення обчислень впливу стандартного температурного режиму пожежі на фрагмент сталеві балки із вогнезахистом з гіпсокартону протягом 60 хв.

2) Аналіз розподілу температури по фрагменту сталеві балки із вогнезахистом з гіпсокартону в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі протягом 60 хв..

3) Встановлення залежності температурного розподілу по фрагменту сталеві балки із вогнезахистом з гіпсокартону від тривалості впливу стандартного температурного режиму пожежі (15 хв, 30 хв, 45 хв та 60 хв) для оцінки ефективності вогнезахисту.

Для проведення досліджень було обрано сталеву балку з двотаврового європейського профілю НЕВ 200. Такий профіль було обрано, оскільки такий тип конструкцій часто вибирається для балок через їх універсальні розміри та міцнісні характеристики. Несуча здатність: НЕВ 200 забезпечує хорошу міцність при помірній вазі, що підходить для багатьох конструкційних задач. Його розміри дозволяють витримувати значні навантаження без необхідності обирати більші профілі. Цей тип профілю має широку сферу застосування – від балок перекриття в будівлях до колон і каркасів. Його висота та товщина стінки підходять для багатьох типів споруд. Вага та розміри НЕВ 200 полегшують монтаж і транспортування, що знижує трудовитрати та підвищує економічність у порівнянні з більшими або важчими профілями. НЕВ 200 є стандартним типорозміром, тому він широко доступний на ринку. Його часте використання також робить його доступним за ціною. Це поєднання технічних та економічних факторів робить НЕВ 200 оптимальним вибором для багатьох будівельних і інженерних задач, саме тому було вирішено використовувати для досліджень саме цю сталеву балку з двотаврового європейського профілю НЕВ 200. Розміри перерізу досліджуваної конструкції наведені у табл. 1.

Табл. 1. Розміри сталеві двотаврової балки НЕВ 200

Тип НЕВ	Висота (h), мм	Ширина полиці (b), мм	Товщина стінки (t_w), мм	Товщина полиці (t_f), мм
200	200	200	9	15

Для проведення моделювання впливу стандартного температурного режиму пожежі було обрано програмне забезпечення ANSYS WB, оскільки цей програмний комплекс надає змогу точно моделювати властивості матеріалів, у тому числі змінні характеристики вогнезахисних матеріалів, які можуть змінюватися в залежності від температури. Це дозволяє більш точно врахувати вплив вогнезахисту на розподіл температури в сталеві балці. Крім цього, цей програмний продукт дозволяє враховувати складні умови теплопередачі конвективного та радіаційного теплообміну, що важливо для адекватного моделювання умов пожежі. Також можна налаштувати точні граничні умови, такі як теплові потоки та теплові втрати [10].

На основі позитивних результатів попередніх досліджень [11, 12], для зменшення розрахункової області та підвищення продуктивності обчислень було вирішено використовувати окремий фрагмент сталеві балки з гіпсокартоном товщиною 5 мм. Це рішення дозволяє розглядати лише частину конструкції, що показано на рис. 1. Товщина гіпсокартонних плит прийнята 20 мм (рис. 1).

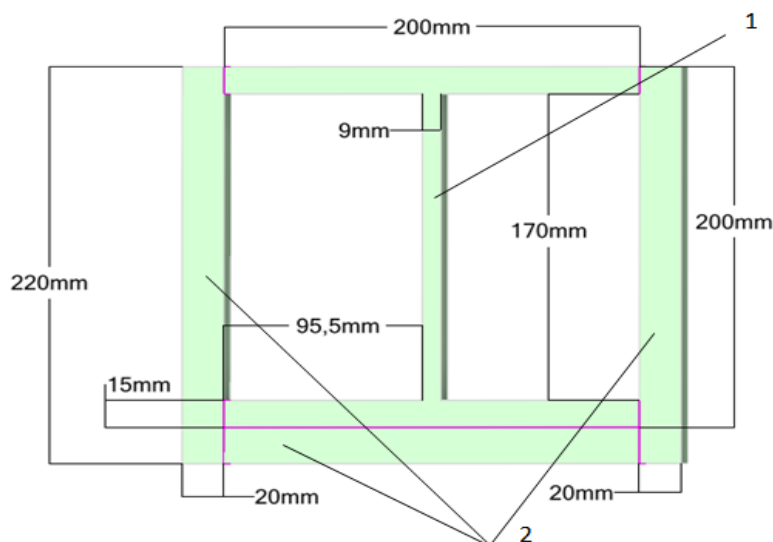


Рис. 1. Конструктивна схема перерізу фрагменту сталевій двотавровій балки з вогнезахистом із гіпсокартону: 1 – сталевий двотавровий профіль НЕВ 200, 2 – плити гіпсокартону

Для проведення досліджень впливу стандартного температурного режиму пожежі на сталеву балку НЕВ 200 було змодельовано 2 матеріали, сталь та гіпсокартон. Теплофізичні властивості сталі прийнято за рекомендаціями [6, 7]. Теплофізичні характеристики гіпсокартону прийнято за рекомендаціями [13] та представлені у табл. 2, 3.

Табл. 2. Коефіцієнт теплопровідності в залежності від температури.

Температура $\Theta, ^\circ\text{C}$	5	100	220	500	800	1100
Коефіцієнт теплопровідності $\lambda, \text{Вт}\times\text{м}^{-1}\times^\circ\text{C}^{-1}$	0,1	0,596	1,35	0,05	0,248	5,428

Табл. 3. Коефіцієнт питомої об'ємної теплоємності в залежності від температури.

Температура $\Theta, ^\circ\text{C}$	5	95	100	120	125	1100
Питома об'ємна теплоємність $c_v, \text{Дж}\times\text{м}^{-3}\times^\circ\text{C}^{-1}$	$2,16\times 10^4$	$2,66\times 10^6$	$3,23\times 10^7$	$3,23\times 10^7$	$1,07\times 10^6$	1×10^4

Густина гіпсокартону прийнята 700 кг/м^3 , сталі 7850 кг/м^3 відповідно.

Скінченно-елементна модель побудована за допомогою гексадральних скінченних елементів типу SOLID, їхня загальна кількість складає 25800 одиниць, скінченно-елементна схема відображена на рис. 2.

Прикладання граничних умов впливу стандартного температурного режиму пожежі на сталеву балку з вогнезахистом із гіпсокартону прийнято трьохстороннім за рекомендаціями [6, 7] та відображено на рис. 3.

Тепловий вплив від стандартного температурного режиму пожежі прийнятий терміном у 60 хв та за рекомендаціями [6, 7], який визначається залежністю:

$$\Theta_s = 345 \lg(8t + 1) + 20, \quad (1)$$

де t – час, що відраховується від початку випробування, хв.; Θ_s – температура, яка відповідає часу t , $^\circ\text{C}$.

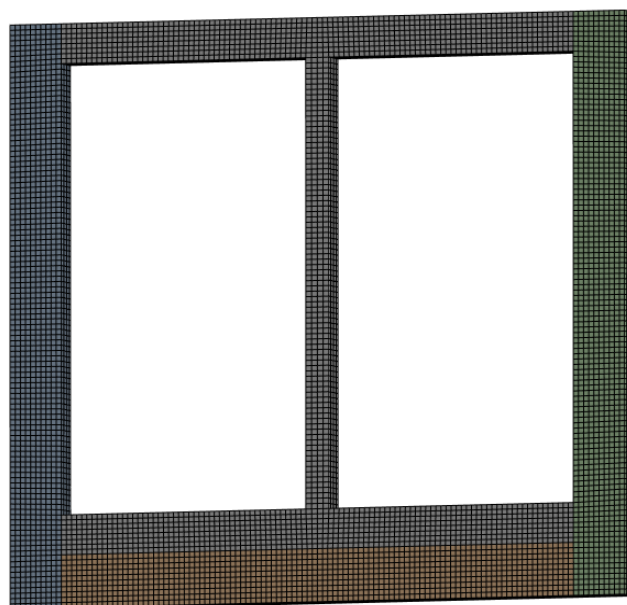


Рис. 2. Скінченно-елементна схема сталевій балки з вогнезахистом із гіпсокартону

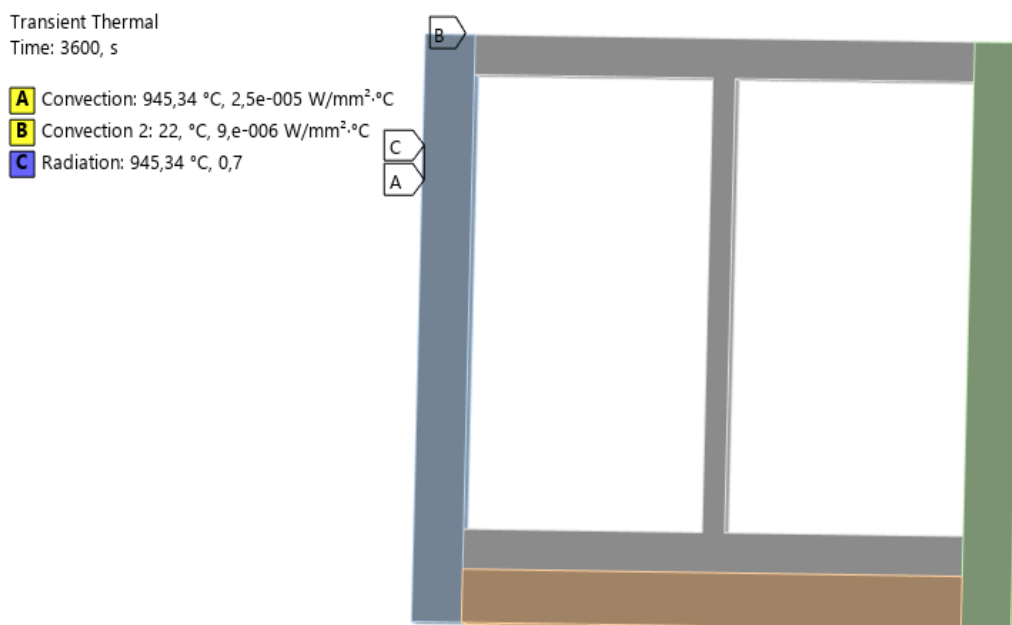


Рис. 3. Прикладання граничних умов впливу стандартного температурного режиму пожежі на сталеву балку з вогнезахистом із гіпсокартону

Термін впливу стандартного температурного режиму пожежі було прийнято 60 хв, оскільки балки з класом вогнестійкості R60 відповідають найвищому I ступеню вогнестійкості будівлі.

5. Результати моделювання впливу пожежі на сталеву балку з вогнезахистом

5.1. Результати розв'язання теплотехнічної задачі

Математичне моделювання проводилось у модулі Transient Thermal програмного комплексу ANSYS WB. Результати розподілу температури в різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі по фрагменту сталевій балки з профілю НЕВ 200 із вогнезахистом з гіпсокартону представлені на рис. 4.

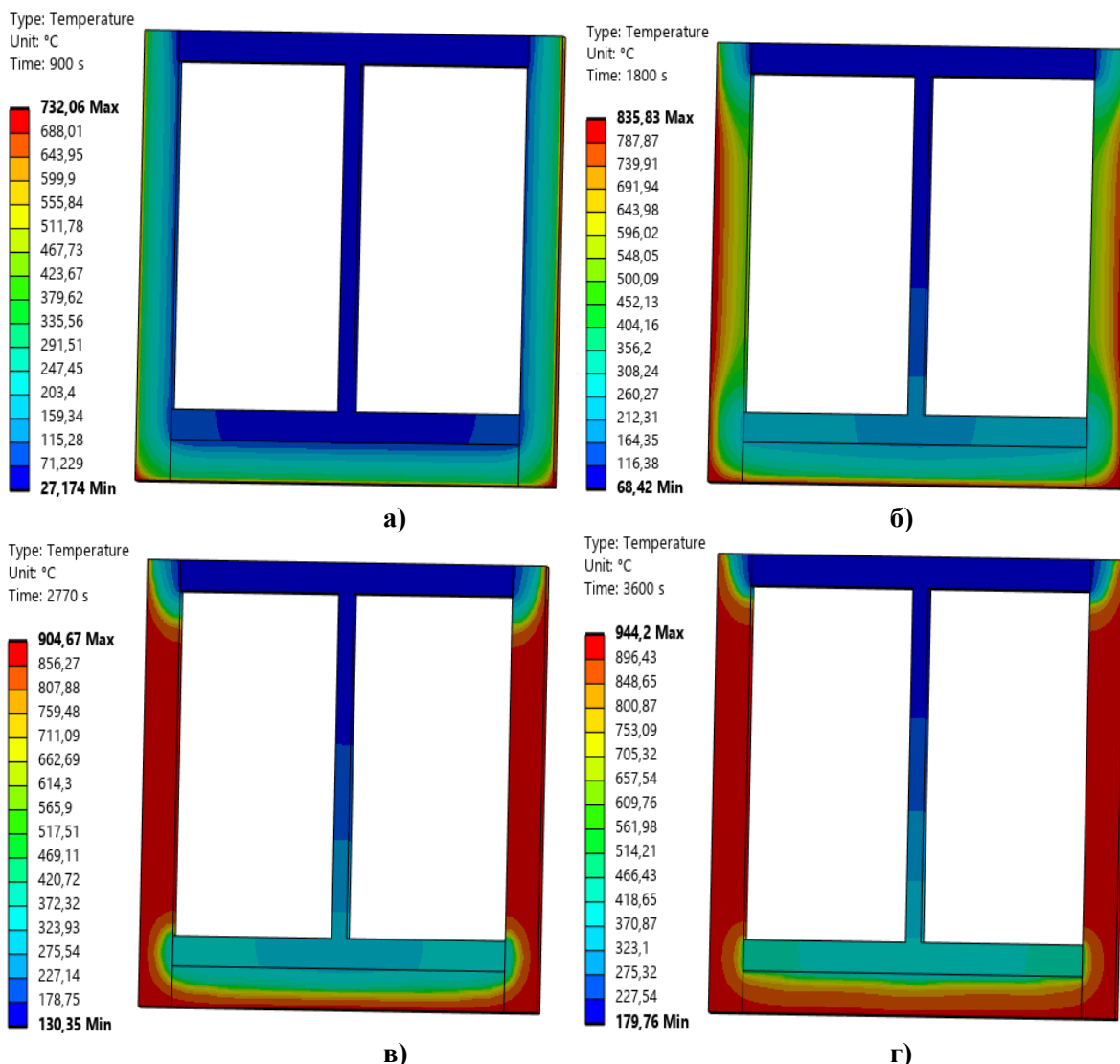


Рис. 4. Візуалізація результатів розподілу температури по фрагменту сталевій балці з профілю НЕВ 200 із вогнезахистом з гіпсокартону у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі: а – 15 хв, б – 30 хв, в – 45 хв, г – 60 хв

Для визначення залежності розподілу температури по балці від тривалості впливу стандартного температурного режиму пожежі (із застосуванням вогнезахисту з гіпсокартону) на рис. 5 показано температурний розподіл безпосередньо в сталевій балці, без візуалізації гіпсокартону.

На рис. 6 відображений графік розподілу мінімальної, середньої та максимальної температури безпосередньо по фрагменту сталевій балці з профілю НЕВ 200 протягом 60 хв.

Максимальна температура в перерізі сталевій балці складає на 15 хв – 81,616 °C, на 30 хв – 243,76 °C, на 45 хв – 339,62 °C та на 60 хв – 442,33 °C.

5.2. Визначення залежності розподілу температури в балці від часу впливу пожежі

За результатами проведених обчислювальних експериментів розподілу температури при теплового впливу пожежі протягом 60 хв безпосередньо по фрагменту сталевій балці з профілю НЕВ 200 з гіпсокартоном, встановлена залежність розподілу максимальної температури в конструкції від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі, яка відображена на рис. 5.

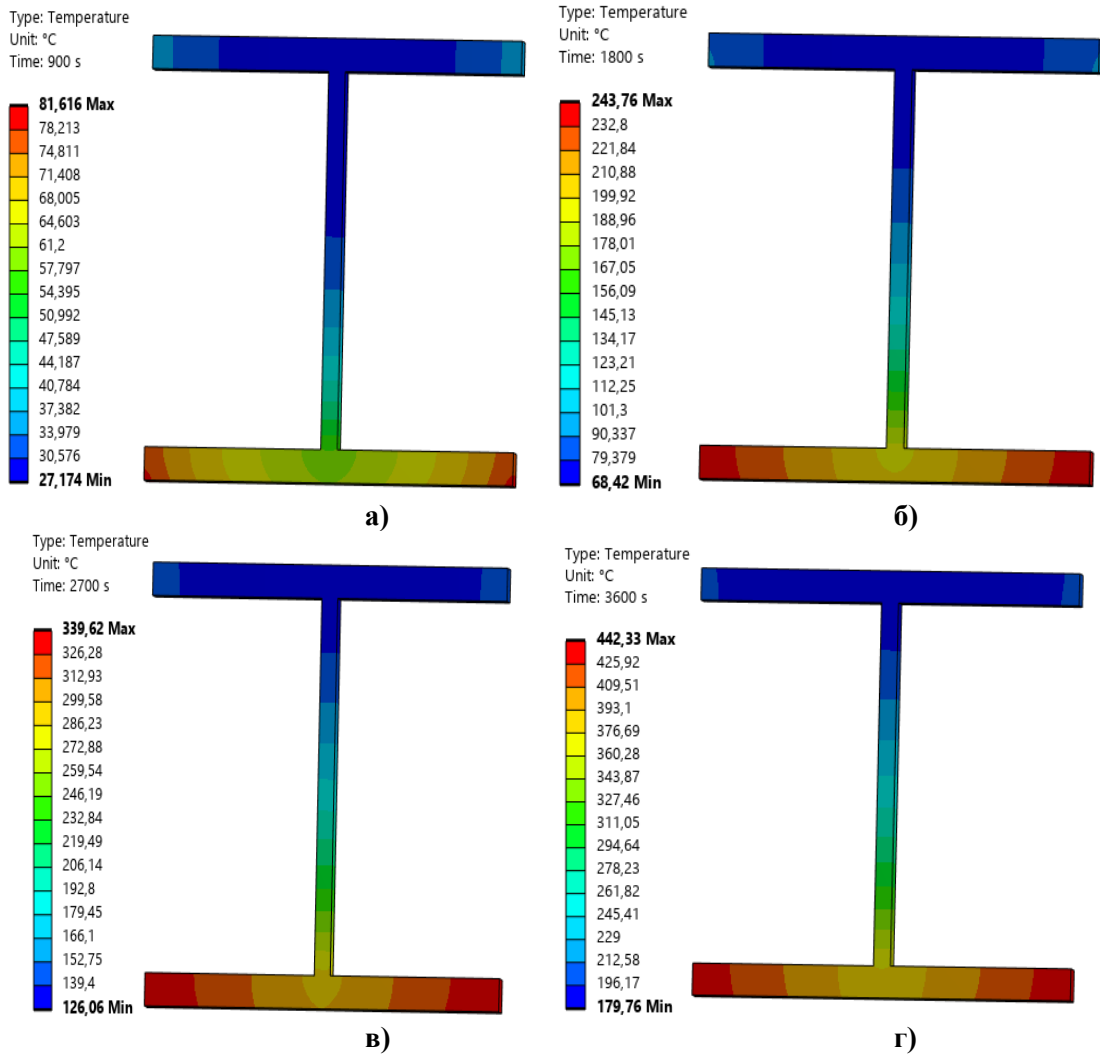


Рис. 5. Візуалізація результатів розподілу температури при впливі стандартного температурного режиму пожежі протягом 60 хв безпосередньо по фрагменту сталевій балки з профілю НЕВ 200 (без візуалізації гіпсокартону)

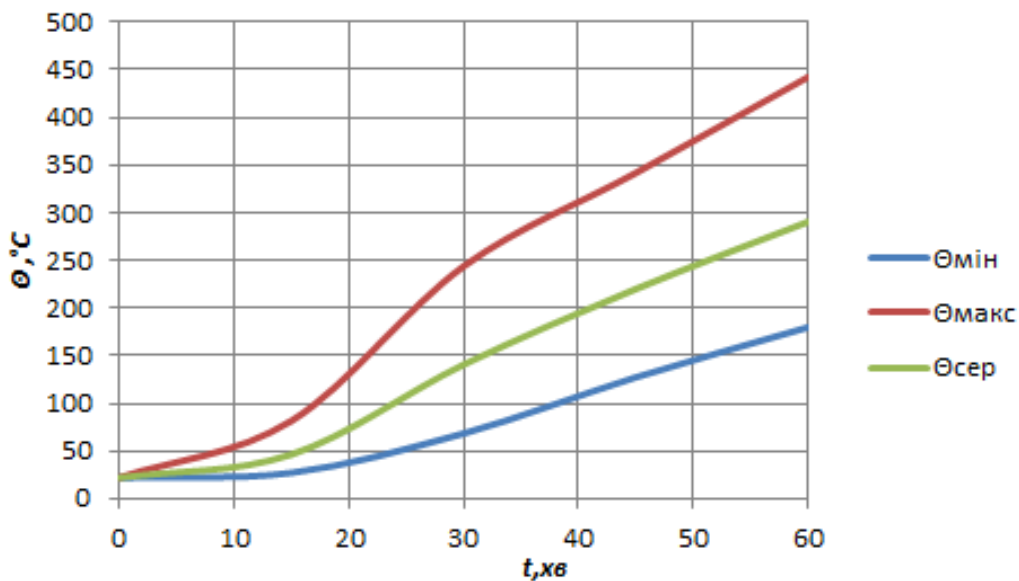


Рис. 6. Графік розподілу мінімальної, середньої та максимальної температур по безпосередньо фрагменту сталевій балки при впливі стандартного температурного режиму пожежі протягом 60 хв

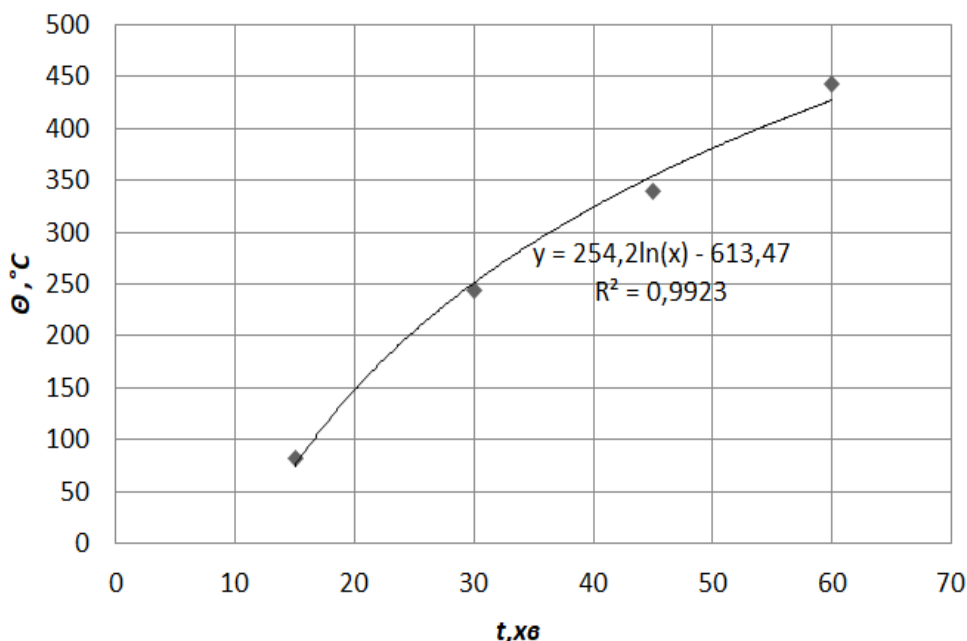


Рис. 6. Графік залежності розподілу максимальної температури в сталевій балці із вогнезахистом з гіпсокартону від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі

Залежність на графіку (рис. 6) показує зміну максимальної температури у перерізі сталеві балки з вогнезахистом із гіпсокартону залежно від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі протягом 60 хв, що можна описати у вигляді: $\Theta_{\text{макс}} = 254,2 \ln(x) - 613,47$.

6. Обговорення результатів розподілу температури при впливі стандартного температурного режиму

Аналіз максимальних температур у сталевій балці профілю НЕВ 200 із захисним шаром гіпсокартону показав, що температура в профілі не перевищує 443 °C (рис. 4, 5). Згідно з даними табл. 4.1 [7], критична температура для сталевих профілів при рівні використання конструкції 80 % становить не менше 496 °C. Отримані результати розподілу температури в сталевій балці пояснюються високою теплоємністю гіпсокартону, який містить кристалічно зв'язану воду. Під час нагрівання ця вода випаровується, поглинаючи значну кількість тепла, що уповільнює нагрівання сталеві балки, тим самим підвищуючи її вогнестійкість. Крім того, врахування змінних теплофізичних характеристик матеріалів дозволило здійснити моделювання реальних умов теплового впливу пожежі.

Особливістю запропонованого методу вогнезахисту є використання гіпсокартону як економічно вигідного та ефективного матеріалу. Відмінність отриманих результатів полягає у врахуванні температурної залежності теплоємності, що значно підвищує точність прогнозування температурного розподілу у сталевій балці з вогнезахистом. Це забезпечує можливість використання отриманих даних для оцінки вогнестійкості таких конструкцій.

При цьому існують обмеження під час проведення досліджень, зокрема моделювання здійснювалося лише за стандартним температурним режимом пожежі. Такий підхід є суворим і не враховує реальних умов пожежі, зокрема фази затухання та нерівномірного нагрівання.

Недоліком проведених досліджень є спрощення геометрії моделі балки, що

унеможливує розв'язання статичної задачі для цієї моделі. Для аналізу напружено-деформованого стану конструкції необхідно враховувати реальні умови закріплення та довжину прольоту балки.

Подальший розвиток досліджень може включати аналіз сталевих балок з гіпсокартонним вогнезахистом в умовах нерівномірного нагрівання, механічного навантаження та реальних пожежних режимів, що дозволить отримати ще більш точні дані для проектування безпечних конструкцій. Однак це може призвести до суттєвого збільшення розрахункової області, що потребує відповідного збільшення обчислювального ресурсу.

7. Висновки

1. Проведене моделювання розподілу температури у сталевій балці профілю НЕВ 200 із вогнезахистом з гіпсокартону продемонструвало ефективність застосування цього матеріалу як захисного шару. Використання гіпсокартонних плит дозволяє значно знизити максимальну температуру в сталевому профілі під впливом пожежного навантаження. Максимальна температура в сталевій балці, яка не перевищує 443 °С навіть після 60 хв впливу пожежі, свідчить про відповідність конструкції класу вогнестійкості R60. Це підтверджує доцільність застосування гіпсокартону для забезпечення пожежної безпеки сталевих конструкцій.

2. За результатами проведених досліджень отримана логарифмічна залежність максимальної температури у перерізі сталеві балки з вогнезахистом залежно від часу впливу пожежі має вигляд: $\Theta_{\text{макс}} = 254,2 \ln(x) - 613,47$. Висока точність апроксимації (коефіцієнт детермінації $R^2=0,9923$) свідчить про адекватність моделі для прогнозування температурного розподілу в умовах пожежного впливу. Ця залежність може бути використана для оцінки вогнестійкості сталевих конструкцій з різним рівнем навантаження.

Література

1. Борсук О., Нуянзін О., Кришталь В., Ведула С., Горовенко М. Дослідження межі вогнестійкості сталеві балки за умови втрати цілісності вогнезахисного покриття. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. 2020. Вип. № 4(2). С. 5–15. URL: <https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/62>

2. Pozdieiev S., Zmaha M., Nedilko I., Zmaha Y. Methods of mathematical modeling of the area carbonation of wooden beams with lining of fire protective plywood. Collection of Scientific Papers of Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Protection of Ukraine «Emergency Situations: Prevention and Liquidation». 2020. Vol. 4(2). P. 97–105. doi: 10.31731/2524-2636.2020.4.2.-97-105

3. Zmaha M. Analysis of research methods for determining the fire of wooden beams with lining of fire protective plywood. Collection of Scientific Papers of Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Protection of Ukraine «Emergency Situations: Prevention and Liquidation». 2021. Vol. 5(2). P. 125–135. doi: 10.31731/2524.2636.2021.5.2.-125-135

4. Franssen J., Gernay T. Modeling structures in fire with SAFIR®: Theoretical background and capabilities. Journal of Structural Fire Engineering. 2017. Vol. 8(3). P. 300–323. doi: 10.1108/JSFE-07-2016-0010

5. Ковальов А., Пурденко Р., Отрош Ю., Томенко В., Качкар Є., Майборо-

да Р. Оцінювання вогнестійкості вогнезахисених сталевих балок. ВІСТІ. 2022. Вип. № 2(51). С. 43–53. doi: 10.31474/1999-981X-2022-2-43-53

6. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-1:2010 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN 1993-1-1:2005/A1:2014, IDT). [Чинний від 01.03.2013]. Міністерство регіонального розвитку та будівництва, 2013. 150 с.

7. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1993-1-2:2005, IDT). [Чинний від 01.03.2013]. Міністерство регіонального розвитку та будівництва, 2013. 98 с.

8. Новак С., Дріжд В., Добростан О. Оцінювання вогнезахисних властивостей покриттів і облицювань для сталевих конструкцій. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2021. Вип. № 2(12). С. 43–53. doi: 10.33269/nvcz.2021.2(12).43-53

9. Buchanan A. Structural design for fire safety. Corus Construction and Industrial. Fire resistance of steel-framed buildings, North Lincolnshire, 2001. 221 p.

10. Pallares-Muñoz M., Paya-Zaforteza I., Hospitaler A. New methodology using beam elements for the analysis of steel frames subjected to non-uniform temperatures due to fires, Structures. 2021. Vol. 31. P. 462–483. doi: 10.1016/j.istruc.2021.02.008

11. Sidnei S., Myroshnyk O., Kovalov A., Veselivskiy R., Hryhorenko K., Shnal T., Matsyk I. Identifying the evolution of through cracks in iron-reinforced hollow slabs under the influence of a standard fire temperature mode. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 4(7(130)). P. 70–77. doi: 10.15587/1729-4061.2024.310520

12. Sidnei S. O., Nuianzin O. M., Kostenko T. V., Berezovskyi A. I., Wasik W. A Method of Evaluating the Destruction of a Reinforced Concrete Hollow Core Slab for Ensuring Fire Resistance. Journal of Engineering Sciences, Ukraine. 2023. Vol. 10(2). P. D1–D7. doi: 10.21272/jes.2023.10(2).d1

13. Довбиш А. В. Обґрунтування умов застосування гіпсокартонних плит як вогнезахисних оздоблювальних матеріалів будівельних конструкцій: дис. канд. техн. наук: 21.06.02. Український НДІ пожежної безпеки. Київ, 2006. 204 с.

14. Сідней С. О. Дослідження впливу скінченно-елементної сітки на розподіл температури по порожнистій плиті під час моделювання пожежі. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2024. Вип. № 1(17). С. 93–102. doi: 10.33269/nvcz.2024.1(17).93-103

N. Zaika, Adjunct

National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

TEMPERATURE DISTRIBUTION PATTERNS OF A STEEL BEAM WITH FIRE PROTECTION FROM GYPSUM BOARD DURING FIRE

The article examines the temperature distribution in steel beams from the HEB 200 profile with fire protection in the form of plasterboard plates under the influence of the standard fire temperature regime. The calculation was carried out in the ANSYS WB software package to determine the dependence of the temperature in the steel structure on the time of exposure to fire. The model allows for a detailed assessment of heat transfer in materials with different thermophysical characteristics, in particular, variable heat capacity and thermal conductivity of steel and plasterboard. The use of plasterboard as a fire-resistant coating is justified by its ability to slow down the heating of steel. This approach makes it possible to significantly increase the fire resistance of steel structures while maintaining their me-

Construction and Civil Engineering. DOI: 10.52363/2524-0226-2024-40-2

chanical integrity. The obtained results showed that the maximum temperature in a steel beam with plasterboard fire protection does not exceed 443 °C even with a duration of fire exposure of 60 minutes, which assumes compliance with the fire resistance class R60. The constructed graph of the dependence of the maximum temperature on the time of exposure to fire confirmed the effectiveness of fire protection with plasterboard and the high accuracy of the approximation of the model (the coefficient of determination $R^2=0.9923$), which indicates the reliability of the results. The proposed model and approach can be used to assess the fire resistance of other steel structural elements, in particular, to select optimal fire-resistant materials. The research is relevant in the context of the development of cost-effective and effective methods of protecting building structures from the effects of high fire temperatures. The method of modeling fire protection in steel beams provides an opportunity to determine the temperature regimes that occur in real fire conditions, and to develop recommendations for increasing the fire resistance of steel structures, especially in modern buildings, where the optimization of material and resource costs is important.

Keywords: modeling, standard fire temperature regime, specific heat capacity, thermal conductivity, fire protection, plasterboard

References

1. Borsuk, O., Nuyanzin, O., Kryshchal, V., Vedula, S., Horovenko, M. (2020). Study of the limit of fire resistance of a steel beam under the condition of loss of integrity of the fire-resistant coating. *Emergency situations: prevention and elimination*, 4(2), 5–15. Available at: <https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/62>
2. Pozdieiev, S., Zmaha, M., Nedilko, I., Zmaha, Y. (2020). Methods of mathematical modeling of the area carbonation of wooden beams with lining of fire protective plywood. *Collection of Scientific Papers of Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Protection of Ukraine «Emergency Situations: Prevention and Liquidation»*, 4(2), 97–105. doi: 10.31731/2524-2636.2020.4.2.-97-105
3. Zmaha, M. (2021). Analysis of research methods for determining the fire of wooden beams with lining of fire protective plywood. *Collection of Scientific Papers of Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Protection of Ukraine «Emergency Situations: Prevention and Liquidation»*, 5(2), 125–135. doi: 10.31731/2524.2636.2021.5.2.-125-135
4. Franssen, J., Gernay, T. (2017). Modeling structures in fire with SAFIR®: Theoretical background and capabilities. *Journal of Structural Fire Engineering*, 8(3), 300–323. doi: 10.1108/JSFE-07-2016-0010
5. Kovalev, A., Purdenko, R., Otrosh, Yu., Tomenko, V., Kachkar, E., Maiboroda, R. (2022). Evaluation of fire resistance of fire-resistant steel beams. *NEWS of the Donetsk Mining Institute*, 2(51), 43–53. doi: 10.31474/1999-981X-2022-2-43-53
6. DSTU-NB EN 1993-1-1:2010 Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-1. General rules and regulations for buildings (EN 1993-1-1:2005/A1:2014, IDT). [Effective from 01.03.2013]. Ministry of Regional Development and Construction, 150.
7. DSTU-NB EN 1993-1-2:2010 Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-2. General provisions. Calculation of structures for fire resistance (EN 1993-1-2:2005, IDT). [Effective from 01.03.2013]. Ministry of Regional Development and Construction, 98.
8. Novak, S., Drizhd, V., Dobrostan, O. (2021). Evaluation of fire-resistant properties of coatings and facings for steel structures. *Scientific bulletin: Civil protection and fire safety*, 2(12), 43–53. doi: 10.33269/nvcz.2021.2(12).43-53
9. Buchanan, A. (2021). Structural design for fire safety. *Corus Construction and Industrial. Fire resistance of steel-framed buildings, North Lincolnshire*, 221.

10. Pallares-Muñoz, M., Paya-Zaforteza, I., Hospitaler, A. (2021). New methodology using beam elements for the analysis of steel frames subjected to non-uniform temperatures due to fires, *Structures*, 31, 462–483. doi: 10.1016/j.istruc.2021.02.008
11. Sidnei, S., Myroshnyk, O., Kovalov, A., Veselivskyi, R., Hryhorenko, K., Shnal, T., Matsyk, I. (2024). Identifying the evolution of through cracks in iron-reinforced hollow slabs under the influence of a standard fire temperature mode. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(7(130)), 70–77. doi: 10.15587/1729-4061.2024.310520
12. Sidnei, S. O., Nuianzin, O. M., Kostenko, T. V., Berezovskyi, A. I., Wąsik, W. (2023). A Method of Evaluating the Destruction of a Reinforced Concrete Hollow Core Slab for Ensuring Fire Resistance. *Journal of Engineering Sciences, Ukraine*, 10(2), D1–D7. doi: 10.21272/jes.2023.10(2).d1
13. Dovbysh, A. (2006). Justification of the conditions for the use of plasterboard boards as fire-resistant finishing materials of building structures: thesis. PhD. technical Sciences: 21.06.02. Ukrainian Research Institute of Fire Safety, Kyiv, 204.
14. Sydney, S. O. (2024). Study of the influence of the finite-element grid on the temperature distribution over a hollow plate during fire simulation. *Scientific bulletin: Civil protection and fire safety*, 1(17), 93–102. doi: 10.33269/nvcz.2024.1(17).93-103

Надійшла до редколегії: 12.10.2024

Прийнята до друку: 13.11.2024