

*Олександр Нуязін, канд. техн. наук, доцент (ORCID: 0000-0003-2527-6073)  
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля  
Національного університету цивільного захисту України*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ НАГРІВАННЯ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ СТАЛЕВИХ ДВОТАВРОВИХ СТЕРЖНІВ ПРИ ВИПРОБУВАННЯХ ЗА СТАНДАРТНИМ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ ПОЖЕЖІ**

*В даній статті проведений аналіз експериментальних вогневих випробувань для встановлення межі вогнестійкості сталевих двутаврових стержнів з вогнезахисним облицюванням мінераловатним покриттям. Наукова новизна даного дослідження полягає у розробці методики виготовлення і формування зразків сталевих колон з вогнезахисним облицюванням мінераловатним покриттям, в розробці методики проведення вогневих випробувань для встановлення закономірності залежності часу настання граничного стану втрати несучої здатності сталевими колонами з вогнезахисним облицюванням.*

*Предметом дослідження є вплив конструктивних параметрів вогнезахисного облицювання на результат оцінки вогнестійкості сталевих двутаврових колон в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі. Головним завданням досліджень, що відображені у даній статті, було виявлення часу досягнення критичної температури у вогнезахисній сталевій конструкції у залежності від товщини облицювання мінераловатним покриттям. В статті також відображені результати випробувань зразків сталевих колон з різною товщиною вогнезахисного облицювання на основі мінераловатного покриття, які були проведені відповідно розробленої методики експериментальних досліджень. Виявлені закономірності показників часу по втраті несучої здатності випробовуваних зразків сталевих колон з вогнезахисним облицюванням в залежності від часу експонування зразків за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі.*

*Отримані результати дослідження дозволять створити математичну модель для прогнозування залежності часу досягнення критичної температури сталеву конструкцією залежно від товщини вогнезахисного облицювання. Побудовану математичну модель можна розглядати як наукове підґрунтя для створення нових інженерних методів розрахунку для оцінки вогнестійкості сталевих конструкцій з вогнезахисним облицюванням мінераловатним покриттям. Такі інженерно-розрахункові методики дозволяють удосконалити нормативну базу щодо проектування вогнестійких сталевих конструкцій.*

**Ключові слова:** сталеві колони, вогнезахисне облицювання, мінераловатне покриття, стандартний температурний режим, математична модель.

**Постановка проблеми.** З розвитком сучасних технологій будівництва останнім часом широкого поширення зазнало застосування удосконалених сталевих конструкцій, проте зважаючи на швидку втрату несучої здатності таких конструкцій, залишається актуальним гарантування їх нормованої вогнестійкості, як складової комплексного забезпечення пожежної безпеки даних об'єктів будівництва.

Ефективним засобом забезпечення проектної вогнестійкості сталевих конструкцій залишається застосування вогнезахисного облицювання. Перспективним матеріалом для вогнезахисного облицювання є мінераловатні плити. Оскільки їх використання надає переваги при виконанні монтажних робіт, їх вартості, а також можливості підвищувати вогнестійкість без демонтажу основних конструкцій.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** За даними досліджень, наведених у роботах [1–3], розглянуті питання нормування вогнестійкості будівельних конструкцій, створення методів математичного моделювання, а також удосконалення розрахункових методик, стосовно вогнестійкості даних конструкцій. Проте, в даних роботах недостатньо приділено уваги прогнозуванню поведінки сталевих колон з вогнезахисним облицюванням з мінераловатним покриттям в умовах дії підвищених температур, оскільки не враховуються особливості зміни параметрів зони обвуглювання. З огляду на це, дослідження з питань вогнестійкості сталевих колон з вогнезахисним облицюванням з мінераловатним покриттям залишаються актуальними.

**Постановка задачі та її розв'язання.** Метою досліджень, проведених у роботі, було вивчення закономірностей прогрівання зразків сталевих колон з вогнезахисним облицюванням з мінераловатним покриттям в залежності від часу опромінювання за умов дії стандартного температурного режиму, як наукового підґрунтя прогнозування їхньої вогнестійкості та розрахункової оцінки.

Для вирішення мети поставлено завдання:

1. Розробити методичку вогневих експериментальних випробувань сталевих колон з вогнезахисним облицюванням з мінераловатним покриттям в умовах впливу дії високих температур;
2. Провести дослідження поведінки зразків сталевих колон з вогнезахистом під дією високих температур і вогнезахисні властивості облицювального матеріалу такого як мінераловатне покриття відповідно стандартного температурного режиму;
3. Провести інтерполяцію отриманих результатів і побудувати математичну модель залежності часу досягнення критичної температури сталеву конструкцією залежно від товщини вогнезахисного облицювання.

**Методи досліджень.** У даній роботі вогневі випробування і дослідження поведінки сталевих колон з вогнезахисним облицюванням проводилися у спеціальній вогневій атестованій печі. За вимогами [4] вогнева піч розміщується у приміщенні, розміри якого, забезпечують максимальну зміну температурних показників повітряного простору до 10 °С, порівняно з початковими значеннями. Проведення випробування допускається за температури навколишнього середовища від 5 до 40 °С і показників вологості повітря у межах від 45 до 75 %. На рис. 1. зображено систему підведення пальної суміші, що подається до форсунок пальників та через нагрівний канал створює вогневу дію з нагнітанням температури всередині камери печі.



Рисунок 1 – Загальний вигляд (а) та схема вогневої печі (б): 1 – корпус печі; 2 – пальники; 3 – канали видалення продуктів згорання; 4 – кришка печі; 5 – люки із дверима.

Температуру у камері вогневої печі фіксують зварними термопарами з діаметром дроту не більше ніж 1,5 мм типу ТХА з неізолюваними проводами та покритими захисним кожухом, що відповідають [5]. Достатню чутливість термопар забезпечують спаєм, що розміщений на кінці дротів завдяки чому, зміни температури надсилаються на вимірювально-ресструючий прилад. Встановлюємо 6 термопар через кожні 0,5 м довжини зразка ( $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{4}$ ), таким чином, щоб вимірювальний спай термопар знаходився на відстані від 95 до 105 мм від поверхні зразка та не менше ніж 200 мм – до стінок печі [1].

Методика виготовлення зразків проводилася відповідно до [5–6] для проведення випробувань сталевих колон з вогнезахисним покриттям, передбачено виконання двох однакових зразків сталевих колон з вогнезахисним покриттям однакової товщини висотою не менше 1 м. Враховуючи вимоги [4, 6, 7] для проведення випробувань, було виготовлено 4 пари зразків колон, що виготовлені з двотаврового профілю № 20, зі зведеної товщини металу 3,4 мм, шириною полки 100 мм та відстанню між зовнішніми поверхнями полиць 200 мм, висотою 2000 мм. Вогнезахисне облицювання виконане з мінераловатних плит «ТехноНіколь Вогнезахист металу», виготовлених за ТУ У В.2.7-26.8-35492904-004:2010 з кам'яної вати на основі гірських порід базальтової групи. Облицювання виконане у двох виглядах: із вставками у простір між полицями двотавра (№ 3, 4, 7, 8) та без вставок (№ 1, 2, 5, 6) (рис. 2.) та із різними товщинами мінераловатних плит, зазначених у табл. 1.



Рисунок 2 – Схема перерізу зразків у відповідності до схеми вогнезахисту. а – переріз зразків № 1, 2, 5, 6; б – переріз зразків № 3, 4, 7, 8

Таблиця 1 – Параметри та товщини облицювання на зразках

Профіль	Вид	Зведена товщина $\delta$ , мм	Зведена товщина коробчаста $\delta_k$ , мм	Коефіцієнт перерізу коробчастий $A_{mk}/V$ , м <sup>-1</sup>	Густина мінвати, кг/м <sup>3</sup>	Товщина облицювання $d$ , мм	Товщина мінвати (ном.) $d_v$ , мм	№ зразка
№20	Колона, 2 м	3,4	4,5	222,2	154	24	20	6
№20	Колона, 2 м	3,4	4,5	222,2	154	25	20	5
№20	Колона, 2 м	3,4	4,5	222,2	154	35	30	2
№20	Колона, 2 м	3,4	4,5	222,2	154	36	30	1
№20	Колона, 2 м	3,4	4,5	222,2	154	52	30+15	8
№20	Колона, 2 м	3,4	4,5	222,2	154	55	30+15	7
№20	Колона, 2 м	3,4	4,5	222,2	154	73	30+30	4
№20	Колона, 2 м	3,4	4,5	222,2	154	75	30+30	3

**Теоретична та експериментальна частина.** При виготовленні зразків відразу були розміщені та закріплені термопари на зразках сталевих конструкцій по центру стінок і на внутрішній поверхні полок двотаврів, що зображено рис. 3. та відповідає [4, 6]. Для ненавантажених зразків розміщення термопар передбачено  $\frac{1}{2}$  висоти.

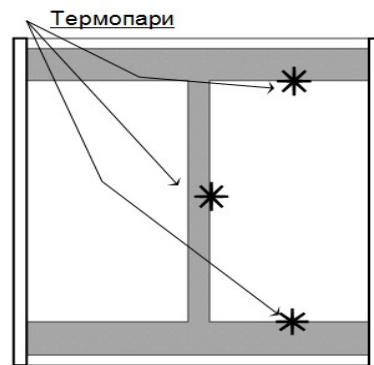


Рисунок 3 – Схема розміщення термопар на зразках сталевій колоні з коробчастим перерізом

Наступним етапом після розміщення термопар стало закріплення мінераловатного облицювання до стінок колони та між плитами, що здійснювалося за допомогою клею «Ceresit» CM-17, що наносився за допомогою шпателя шаром у 3-5 мм. Для надійності кріплення й фіксації плит між собою та на стиках використано будівельні цвяхи 3 x 75; 5,5 x 150; 6 x 200 мм з кроком скріплювання 400-500 мм.

Відповідно до [4, 6] верхній торець зразка повинен захищатися від нагрівання, що при виготовленні зразка було реалізовано через встановлення теплоізоляційного ущільнення, виготовленого з мінеральної вати завтовшки 60 мм та густиною 156 кг/м<sup>3</sup>.

Методика проведення вогневого випробування. Підготовлені до випробування зразки із теплоізоляцією верхньої частини колон було встановлено до камери вогневої печі. Закріплення зразків здійснювалось фіксацією нижнього краю за допомогою металевих кутників, як показано на рис. 4.

Відповідно до [6] випробування металевих колон з вогнезахисним облицюванням дозволяється проводити без навантаження на двох однакових зразках заввишки не менше 1 м. За [6] мінімальна відстань від зразка до стінок печі та між зразками повинна складати не менше 200 мм. Розміри печі створюють умови для випробування 8 зразків колон у два етапи з одночасним установленням по 4 зразки у камеру печі. У перший етап проведено дослідження зразків № 1 (36 мм), № 2 (35 мм), № 3 (75 мм), № 4 (73 мм), у другий етап – № 5 (25 мм), № 6 (24 мм), № 7 (55 мм), № 8 (52 мм), встановлення зразків здійснено за схемою зображеною на рис. 5.

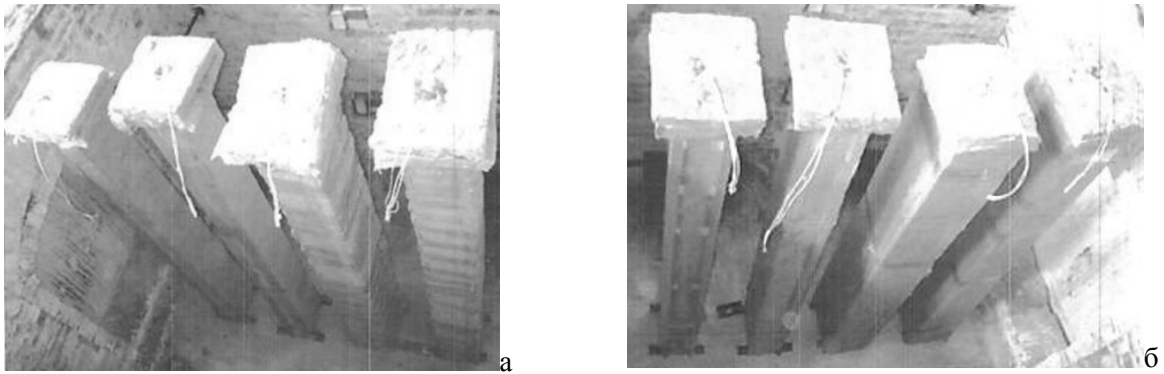


Рисунок 4 – Вигляд зразків до початку випробувань: а) зразки колон № 1 – № 4; б) зразки колон № 5 – № 8

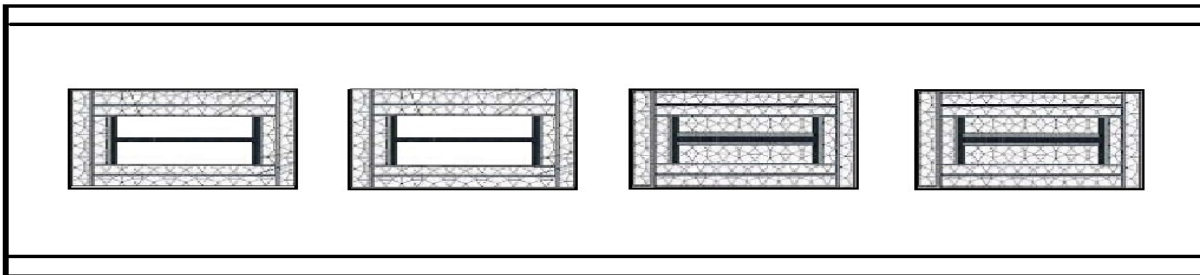


Рисунок 5 – Схема встановлення зразків колон за способом нанесення вогнезахисного облицювання (зразки № 1, 2, 5, 6 – без вставок; зразки № 3, 4, 7, 8 – із вставками)

**Результати та їх обговорення.** Відповідно до розробленої методики експериментальних досліджень було проведено вогневі випробування зразків фрагментів сталевих стержнів із стандартного двотаврового профілю, що завершені за умови перевищення початкової температури металеві конструкції на 480 °С, тобто досягнення значень, усереднених за показниками відповідних термопар у зразках, величини 500 °С, оскільки вважається, що дане значення є середнім при якому дуже часто відбувається втрата несучої здатності у несучих сталевих конструкціях. Конструктивні характеристики зразків та час досягнення критичної температури наведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Показники часу по втраті несучої здатності випробовуваних зразків

І тип зразків		ІІ тип зразків	
№ зразка, (товщина облицювання, мм)	Час втрати несучої здатності, хв	№ зразка, (товщина облицювання, мм)	Час втрати несучої здатності, хв
№ 1 (36 мм)	89	№ 5 (25 мм)	68
№ 2 (35 мм)	86	№ 6 (24 мм)	63
№ 3 (75 мм)	192	№ 7 (55 мм)	147
№ 4 (73 мм)	185	№ 8 (52 мм)	138

З метою визначення впливу температури на щільність з'єднання плит вогнезахисного облицювання між собою був проведений візуальний огляд поверхні зразків після випробувань. Вигляд зразків після завершення випробування зображено на рис. 6-7.

Згідно із результатами візуального огляду виявлено, що на теплоізоляційних стиках, з'єднаних клеєвою сумішшю, у результаті дії високої температури відбулась дегідратація суміші та відбулась поява тріщин. Це означає, що під час пожежі висока температура негативно впливає на цілісність облицювання, що може привести до передчасного настання граничного стану (втрати несучої здатності) конструкцією. Тож контроль ознака зберігання цілісності системи вогнезахисної є важливим для гарантування нормальної роботи вогнезахисної системи при забезпеченні необхідного класу вогнестійкості, на який вона розрахована.

Для попереднього аналізу закономірності залежності часу настання граничного стану втрати несучої здатності сталевими конструкціями була побудована крива часу досягнення критичної температури 500 °С залежно від товщини вогнезахисного облицювання (див. табл. 3.).



Рисунок 6 – Вигляд зразків № 1 – № 4: а – до початку випробувань; б – після проведення випробувань

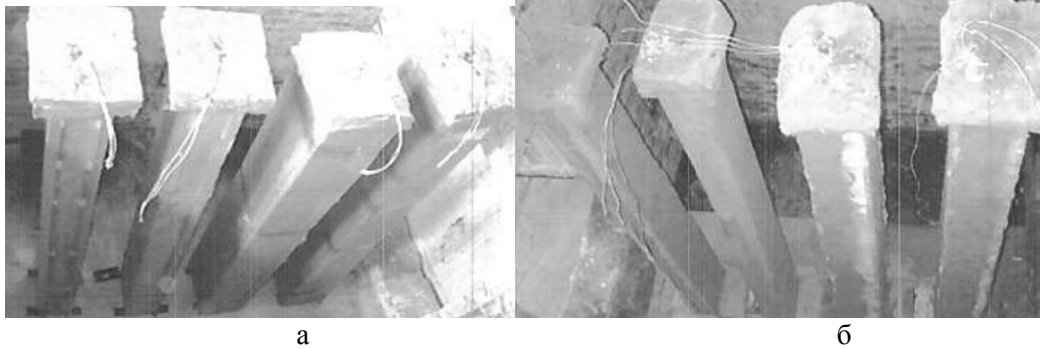


Рисунок 7 – Вигляд зразків № 5 – № 8: а – до початку випробувань; б – після проведення випробувань

Таблиця 3 – Час досягнення критичної температури 500 °С у вогнезахисній сталевій конструкції у залежності від товщини облицювання

Товщина облицювання, $d_p$ , мм	24	25	35	36	52	55	73	75
Час досягнення критичної температури, $U$ , хв	62	67	85	87	137	146	184	191

На рис. 8. наведена побудована крива за даними табл. 3.

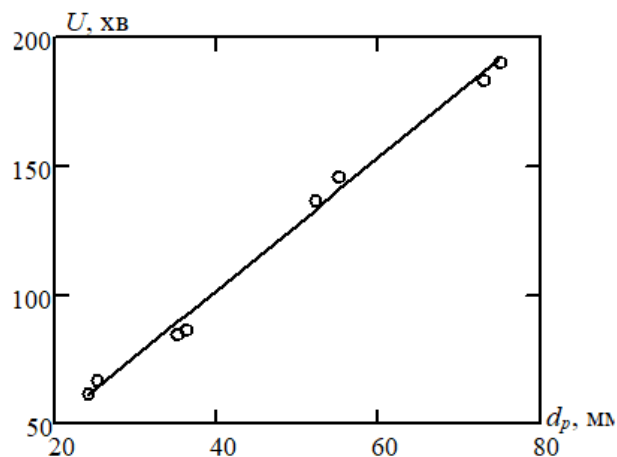


Рисунок 8 – Крива часу досягнення критичної температури 500 °С залежно від товщини вогнезахисного облицювання

Крива, наведена на рис. 8, відповідає лінійній залежності, тож для описання залежності часу досягнення критичної температури може бути використана лінійна регресійна модель.

Аналіз даних у табл. 3 та рис. 8 показав, що можна припустити, що може бути отримано математичне описання залежності часу досягнення критичної температури у залежності від таких параметрів: величини товщини вогнезахисного облицювання та значення критичної температури, може бути здійснене за допомогою лінійної регресійної моделі відповідно до виразу [6, 8]:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_1 x_2 ; \quad (1)$$

де  $a_0, a_1, a_2, a_3$  – коефіцієнти регресійної моделі.

Коефіцієнти регресійної моделі подані у табл. 4.

Таблиця 4 – Коефіцієнти регресії для прийнятої моделі часу досягнення критичної температури

Модель	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_1 x_2$	145.25	67.25	39.75	11.75

З використанням одержаної регресійної залежності часу досягнення критичної температури була побудована відповідна поверхня його залежності від розглянутих найбільш значущих параметрів вогнезахисного елемента сталеві конструкції, що зображена на рис. 9.

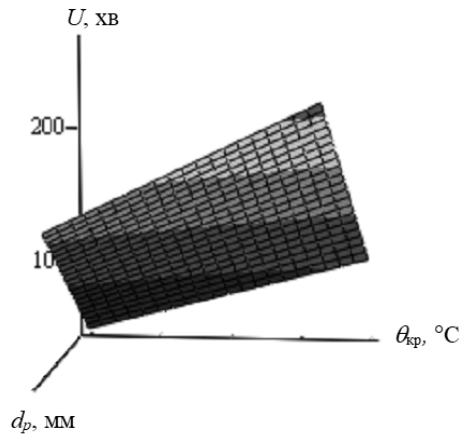


Рисунок 9 – Поверхня залежності часу досягнення критичної температури від обраних параметрів вогнезахисного елемента сталеві конструкції

Для описання залежності часу досягнення критичної температури ( $U$ ) від розглянутих від зазначених параметрів вогнезахисного елемента сталеві конструкції застосовується вираз:

$$U = 33.938 + 1.397 \cdot d_p - 0.081 \cdot \theta_{cp} + 2.35 \cdot 10^{-3} d_p \cdot \theta_{cp}; \quad (2)$$

де  $d_p$  – товщина облицювання,  $\theta_{cp}$  – значення критичної температури.

Для більшої наочності та можливості застосування отриманих результатів для застосування номографічного методу [7] була побудована номограма, яка наведена на рис. 10.

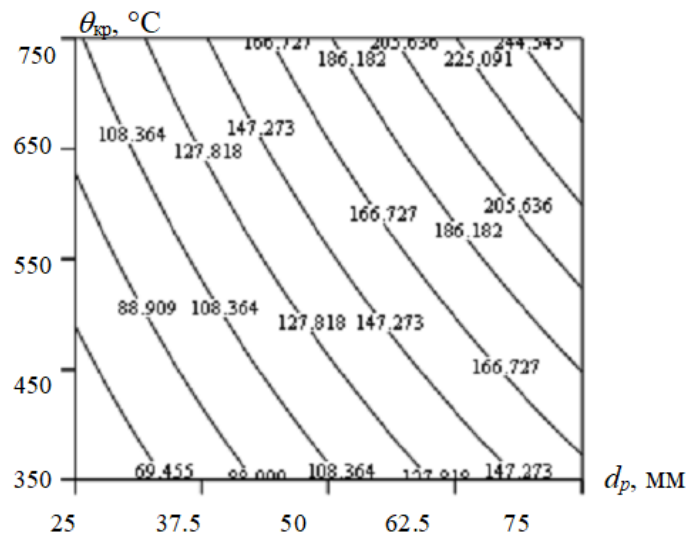


Рисунок 10 – Номограма для визначення межі вогнестійкості, що розрахована за умови досягнення критичної температури із врахуванням товщини вогнезахисного мінераловатного облицювання

На основі створеної математичної моделі були побудовані номограми для оцінки класу вогнестійкості сталевих конструкцій з вогнезахисним мінераловатним облицюванням. Отримані дані дозволяють провести визначення мінімальних розмірів вогнезахисного мінераловатного облицювання сталевих конструкцій для забезпечення необхідної нормованої вогнестійкості.

**Висновки.** Таким чином за результатами даної роботи було розроблено методика вогневих експериментальних випробувань сталевих колон з вогнезахисним облицюванням з мінераловатним покриттям в умовах впливу дії високих температур, відповідно якої проведено дослідження поведінки зразків сталевих колон із стандартним температурним режимом пожежі. Виявлено, що під час пожежі висока температура негативно впливає на цілісність облицювання, що може привести до передчасного настання граничного стану (втрати несучої здатності) конструкцією. Проте, при проведенні обстеження та зовнішнього огляду зразків, що випробовувались, значних руйнувань вогнезахисного облицювання не було виявлено, чим пояснюється висока вогнезахисна здатність облицювання. Відповідно до даних розробленої математичної моделі щодо часу досягнення у випробовуваних зразках, критична температура 500 °С найшвидше була досягнута на 63 хвилині в зразку із найтоншим вогнезахисним облицюванням 36 мм, а найпізніше – в зразку із вогнезахисним облицюванням 73 мм (найтовщим) – на 192 хв. Це свідчить про високу вогнезахисну здатність облицювання, оскільки при вірно підібраній товщині облицювання можливо досягти відповідності найвищого класу вогнестійкості R 180.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Pozdeev S., Nuianzin O., Sidnei S., Shchipets S Computational study of bearing walls fire resistance tests efficiency using different combustion furnaces configurations // MATEC Web of Conferences, 116, art. no. 02027, DOI:10.1051/mateconf/201711602027.
2. Pozdeev S., Nekora O., Slovynsky V. The research of bearing capacity of reinforced concrete beam with use combined experimental-computational method // MATEC Web of Conferences, 116, art. no. 02024, DOI: 10.1051/mateconf/201711602024.
3. Фещук Ю.Л., Поздеев С.В., Нижник В.В., Новгородченко А. Ю. Метод интерполяции температурных полей в сечении фрагментов деревянных колонн с огнезащитной облицовкой. // Журнал «Вестник Кокшетауского технического института» комитета по чрезвычайным ситуациям МВД Республики Казахстан № 3 (31), 2018 г., Кокшетау. С.64 – 73.
4. ДСТУ Б В.1.1-4-98 Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Пожежна безпека. (ISO 834: 1975) [Чинний від 1998-10-28.] – К.: Укрархбудінформ, 2005. – 20 с – (Національний стандарт України).
5. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2012 Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість.– К.: Укрархбудінформ, 2012. – 77 с.
6. ДСТУ Б В.1.1-17:2007 Вогнезахисні покриття для будівельних несучих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності. (ENV 13381-4:2002). [Чинний від 2007-01-01.] – К.: Укрархбудінформ, 2007. – 62 с – (Національний стандарт України).
7. EN 13501-1:2002 “Fire classification of construction products and building elements” – Part 1.2. European Committee for Standardization, Brussels, 2002.
8. Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента / Хикс Ч. – М.: 2013. – 203 с.

## REFERENCES

1. Pozdeev S., Nuianzin O., Sidnei S., Shchipets S Computational study of bearing walls fire resistance tests efficiency using different combustion furnaces configurations / MATEC Web of Conferences, 6th International Scientific Conference “Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings” (Transbud-2017). P. 1-5.
2. Pozdeev S., Nekora O., Slovynsky V. The research of bearing capacity of reinforced concrete beam with use combined experimental-computational method / MATEC Web of Conferences 116, 02024 (2017). - Transbud 2017, 116, P. 2 – 5.
3. Feshchuk Yu. L., Pozdeev S. V., Nizhnik V. V., Novgorodchenko A. Yu. Metod interpoliatsii temperaturnykh poley v sechenii fragmentov derevyanyh kolon s ognezashchitnoy oblitsovkoy. / Zhurnal “Vestnik kokshetauskogo tekhnicheskogo institute” komiteta po chrezvychnym situatsiam. MVD Respubliki Kazakhstan. № 3 (31) 2018. Kokshetau. S. 64 -73/

4. DSTU B V.1.1-4-98 Budivelni konstruktsii. Metody vyprobuvan na vohnestiikist. Zahalni vymohy. Pozhezhna bezpeka. (ISO 834: 1975) [Chynnyi vid 1998-10-28.] – K.: Ukrarkhbudininform, 2005. – 20 s – (Natsionalnyi standart Ukrainy).
5. DSTU-N B EN 1993-1-2:2012 Proektuvannia stalevykh konstruktsii. Chastyna 1-2. Zahalni polozhennia. Rozrakhunok konstruktsii na vohnestiikist.– K.: Ukrarkhbudininform, 2012. – 77 s.
6. DSTU B V.1.1-17:2007 Vohnezhakhysni pokryttia dlia budivelnykh nesuchykh konstruktsii. Metod vyznachennia vohnezhakhysnoi zdatnosti. (ENV 13381-4:2002). [Chynnyi vid 2007-01-01.] – K.: Ukrarkhbudininform, 2007. – 62 s – (Natsionalnyi standart Ukrainy).
7. EN 13501-1:2002 “Fire classification of construction products and building elements” – Part 1.2. European Committee for Standardization, Brussels, 2002.
8. Hicks Ch. Fundamental Concepts In The Design of Experiments, – M.: 2013. – 203 c.

*Oleksandr Nuianzin, PhD in technical sciences, docent,  
Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes of NUCD in Ukraine*

#### **RESEARCH HEATING OF THE FIRE-PROTECTED STEEL I-BEAM RODS DURING STANDARD TEMPERATURE FIRE MODE TESTS**

*In the article the analysis of experimental fire tests for establishment of a limit of fire resistance of steel columns with fire-retardant mineral wool covering is carried out. The scientific novelty of this study is to develop a method of manufacturing and forming samples of steel columns with fire-retardant mineral wool coating, to develop a method of conducting fire tests to establish patterns the dependence of the time of onset of the limit state of loss of bearing capacity of steel columns with fire-retardant cladding.*

*The subject of the study is the influence of design parameters of fire-retardant cladding on the results of the estimated assessment of fire resistance of steel columns under the influence of the standard fire temperature mode. The main task of the research reflected in this article was to identify the peak time of a critical temperature of a fire-retardant steel structure depending on the thickness of the mineral wool coating. The article also reflects the test results of samples of steel columns with different thickness of fire-retardant cladding based on mineral wool coating, which were carried out in accordance with the developed methodology of experimental studies. The regularities of time indicators on the loss of bearing capacity of the tested samples of steel columns with fire-retardant cladding depending on the exposure time of the samples under the influence of the standard temperature of the fire.*

*The obtained research results will allow to create a mathematical model for predicting the dependence of the time of reaching the critical temperature of the steel structure depending on the thickness of the fire-retardant cladding. The constructed mathematical model can be considered as a scientific basis for the creation of new engineering methods of calculation for the assessment of fire resistance of steel structures with fire-retardant mineral wool coating. Such engineering and calculation techniques allow to improve the regulatory framework for the design of fire-resistant steel structures.*

**Key words:** *steel columns, fire-retardant cladding, mineral wool coating, standard temperature regime, mathematical model.*