

УДК 624.012.4

DOI: <https://doi.org/10.52363/2524-2636.2025.9.1.16>

Ігор ФЕДЧЕНКО (ORCID ID: 0009-0001-7129-4080)

Світлана ФЕДЧЕНКО, доктор філософії (ORCID ID: 0000-0003-3294-2214)

Національний університет цивільного захисту України

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ СТАЛЕБЕТОННИХ КОЛОН В УМОВАХ ПОЖЕЖІ

Сталобетон є композитним матеріалом, який поєднує в собі високу міцність сталі та тривку деформативність бетону. Завдяки цьому він демонструє покращені експлуатаційні характеристики, особливо у конструкціях, що піддаються значним статичним або динамічним навантаженням в умовах пожежі.

У контексті сучасного будівництва, сталобетонні конструкції мають значний потенціал, зокрема в проєктуванні висотних будівель, мостів, промислових споруд, а також у післяконфліктному відновленні зруйнованої інфраструктури. Поєднання елементів сталевих рам і бетонного заповнення дозволяє не лише зменшити габарити конструктивних елементів, але й підвищити їхню довговічність, несучу здатність і вогнестійкість.

Метою статті є дослідження поведінки сталобетонних колон за стандартного температурного режиму пожежі. В роботі основну увагу приділено аналізу зміни теплофізичних характеристик сталі та бетону за підвищених температур, що суттєво впливають на несучу здатність конструкцій. Для оцінювання вогнестійкості трубобетонних колон застосовано метод числового розрахунку, із подальшим використанням скінченно-елементного підходу, де буде враховано нелінійну роботу матеріалів у часі та просторі. У роботі розглянуто вплив геометричних параметрів колони, типу перерізу, а також теплофізичні властивостей обоими на граничні стани конструкцій. Визначено, що досліджувана сталобетонна колона відповідає класу вогнестійкості R 90.

Результати досліджень можуть бути використані при проєктуванні вогнестійких несучих елементів критично важливих об'єктів інфраструктури.

Ключові слова: сталобетон, вогнестійкість, випробування, колона, перекриття, температура.

Постановка проблеми. Для підвищення надійності будівель в умовах теплового впливу виникла потреба в пошуку нових поєднань бетону та сталі для їх спільної ефективної роботи в будівельній конструкції. До таких будівельних конструкцій відносяться елементи зі сталобетону. Використання цих конструкцій в будівлях та спорудах різного призначення обумовлюється особливостями архітектурно-планувальних рішень та їх економічною доцільністю.

Сталобетонні конструкції надійні в експлуатації, оскільки здатні довгий час витримувати зростаючі навантаження. Найраціональніше їх використовувати у вигляді стійок, що сприймають великі навантаження; у вигляді конструкцій, що працюють на згин; а також в інженерних спорудах. На відміну від сталевих та залізобетонних колон, сталобетонні несучі конструкції демонструють вищу стійкість в екстремальних умовах, зокрема під час пожежі. Вони здатні протягом тривалого часу зберігати несучу здатність під дією робочих навантажень, тоді як інші типи конструкцій за аналогічних умов втрачають її значно раніше.

Головною проблемою при конструюванні збірних та монолітних конструкцій є необхідність забезпечити несучу здатність і тріщиностійкість в з'єднаннях сталобетонної колони з монолітним безбалковим перекриттям.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сталобетон один з найбільш прогресивних та доцільних матеріал, що потребує мінімальної кількості додаткових елементів та зварювальних робіт. В сталобетонних конструкціях працює як бетон, так і сталь.

Сталобетонні конструкції можна класифікувати за видом використовуваних матеріалів, за призначенням та способом зведення. Композиція таких матеріалів ефективна при використанні у стиснених конструкціях (стійках, колонах тощо), при перекриванні прольотів будівель і споруд (балках, ригелях, плитах, фермах, арках і т.п.). А їх виготовлення не потребує спеціального обладнання. До недоліків сталобетону варто віднести значну власну вагу конструкції.

В [1] розглянуті трубобетонні конструкції, які є основною складовою сталезалізобетонних конструкцій. Таке поєднання суттєво підвищує несучу здатність всього елемента. Проте не розглянута міцність, жорсткість та довговічність вузлів з'єднань елементів, що забезпечують передачу зусиль.

У [2] проаналізовано методи визначення вогнестійкості елементів сталевих каркасів промислових будівель, а саме розглянуто тепловий вплив на сталевий двотавровий елемент. Проте не розглянута поведінка даного елемента за умови наявності захисного шару бетону.

Автори роботи [3] досліджували закономірності прогрівання досліджуваних зразків сталевих колон з вогнезахисним облицюванням з мінераловатним покриттям в залежності від часу випробування за умов впливу стандартного температурного режиму. Проте не було враховано спільну роботу сталевих колон і бетонної плити.

У [4] описаний вплив конструктивних параметрів вогнезахисного облицювання на результати розрахункової оцінки вогнестійкості сталевих колон в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі. Проте в якості вогнезахисного облицювання використано мінераловатне покриття, а не бетон.

У роботі [5] було відтворено процес проведення реального експерименту із нагрівання сталезалізобетонного фрагмента плити з гофрованим профілем, проте не досліджено спільну роботу сталезалізобетонної плити з сталобетонною колоною.

У [6] проаналізовано поведінку сталевих порожнистих колон в умовах підвищених температур. Було створено скінчено-елементні моделі для чисельного моделювання термостійкості таких колон. Водночас, у дослідженні не розглянуто можливість застосування цих моделей до сталевих конструкцій заповнених бетоном.

Основні вимоги щодо проєктування сталобетонних конструкцій описані у нормативних документах [7–8], а оцінювання вогнестійкості методом вогневих випробувань проводиться відповідно до нормативного документу [9].

Отже, аналіз літературних джерел показав, що дослідження спільної поведінки залізобетонних, сталевих елементів з сталобетонними в умовах теплового впливу є актуальними для подальших наукових досліджень.

Постановка завдання. Метою дослідження є оцінювання вогнестійкості сталобетонних колон при діючому навантаженні залізобетонних перекриттів за допомогою чисельного методу.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані завдання:

- проаналізувати актуальні літературні джерела щодо існуючих сталобетонних елементів конструкції;
- визначити конструктивну схему досліджуваного елемента та розробити основні положення чисельного методу розв'язку задачі теплопровідності.

Виклад основного матеріалу дослідження. Аналіз існуючих наукових публікацій та теоретичних досліджень показав, що сталобетонні колони бувають різного типу.

В [7] приведені основні типи поперечних перерізів, які застосовуються при проєктуванні комбінованих колон і комбінованих стиснутих елементів з перерізами із монолітного бетону, частково заповнених перерізів та заповнених бетоном квадратних і круглих труб, що зображені на рис.1.

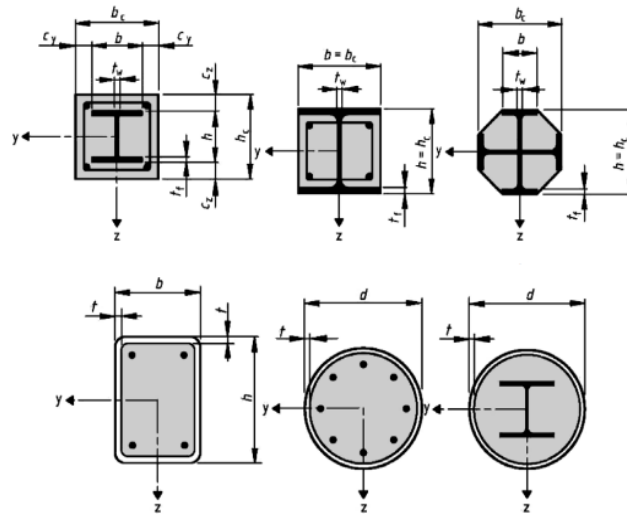


Рисунок 1 – Типові перерізи комбінованих колон [7]

Найпоширеніші з них містять сталеву оболонку заповнену бетоном чи забетонований сталевий двотавровий профіль. Такі конструкції ефективно працюють як окремі стійки чи колони будівель та споруд різного призначення. Сталева оболонка чи двотавир працює армуванням та створює додаткові напруження обтиску бетонної суміші [10 – 11]. Основна мета — поєднати жорсткість і вогнестійкість бетону з високою міцністю та легкістю сталі. Такі конструкції є ефективним рішенням для житлових та адміністративних будівель, виробничих приміщень; транспортної інфраструктури (мости, естакади); при енергоефективному та модульному будівництві.

В даній роботі досліджуються трубобетонні колони заповнені бетоном. З огляду на конструктивні особливості трубобетонних колон, саме сталевая труба виконує визначальну функцію у формуванні їх несучої здатності. Умови пожежі суттєво впливають на цей елемент, оскільки сталевая оболонка колони першою піддається інтенсивному тепловому впливу.

Для дослідження поведінки сталебетонних колон в умовах стандартного температурного режиму пожежі розглядається колона, конструктивна схема перерізу якої зображена на рис. 2.

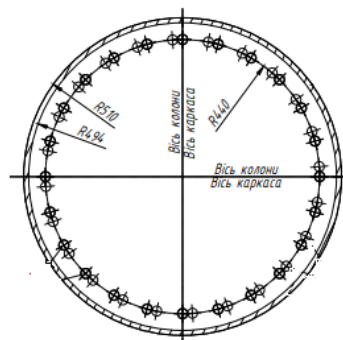


Рисунок 2 – Конструктивна схема перерізу трубобетонної колони

Характеристики матеріалів колони наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики матеріалів колони

Труبوبетонна колона	
Параметри сталеві обійми	Клас бетону
Труба Ø1025 сталь С255	С 25/30

Для проведення дослідження була прийнята схема теплової дії на труبوبетонну колону під дією навантаження перекриття, що наведена на рис. 3.

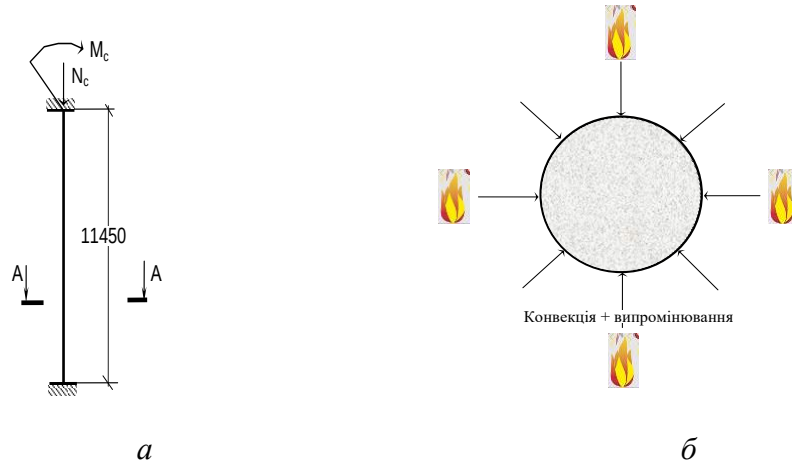


Рисунок 3 – Розрахункова схема сталобетонної колони (а) та схема вогневого впливу пожежі на колону (б)

Для розрахунку розподілу температури у перерізі труبوبетонної колони в умовах стандартного температурного режиму пожежі, був застосований узагальнений інженерний підхід, що рекомендований у [11]. Даний підхід має такі основні положення:

1. Для розрахунку використовується рівняння теплопровідності з граничними умовами (ГУ) III роду при врахуванні конвекційного і променевого теплообміну із середовищем пожежі і має температурозалежні коефіцієнт теплопровідності, питому теплоємність та густину.
2. Температурний режим пожежного середовища, що має відповідати кривій стандартного температурного режиму пожежі.
3. Теплотехнічна задача розв'язується для розрахункової області, яка містить сталеву обійму та бетон.
4. Бетон труبوبетонної колони має теплофізичні характеристики (ТФХ), які представляються температурними залежностями, згідно із [7].
5. Рівняння теплопровідності має бути апроксимоване із застосуванням методу скінченних елементів (МСЕ) з використанням комп'ютерної системи ANSYS APDL.

Рівняння теплопровідності записується у вигляді, який поданий у [12] та наведений нижче:

$$C_p = (t)\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(t) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right), \quad (1)$$

де:

$\rho(\theta)$ – густина бетону, (кг/м³);

$c_p(\theta)$ – питома теплоємність бетону, залежна від температури θ , (Дж/кг·К);

$\lambda(\theta)$ – коефіцієнт теплопровідності бетону, залежний від температури θ , (Вт/м·К).

Коефіцієнт теплообміну враховує процеси конвекції, теплового випромінювання та визначено як:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_p, \quad (2)$$

де:

α_r – коефіцієнт променевого теплообміну, Вт/(м²·К);

α_k – теплообмін на обігрівній поверхні, становить 25 Вт/(м²·К).

$$\alpha_p = \varepsilon \cdot \sigma \frac{\theta_w^4 - \theta_p^4}{\theta_w - \theta_p}, \quad (3)$$

де:

$\varepsilon = 0,7$ – ступінь чорноти поверхні бетону [11];

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К) – стала Стефана-Больцмана.

Температура пожежного середовища визначається при використанні стандартної температурної кривої.

Для виконання теплотехнічного моделювання роботи трубобетонної колони за умов дії високих температур були використані теплофізичні характеристики бетону відповідно до положень частини 2 стандарту Eurocode 4 [7]. У вказаному нормативному документі рекомендовано враховувати температурну залежність таких показників, як питома теплоємність бетону та коефіцієнт теплопровідності, що мають бути визначені на основі аналітичних залежностей. Відповідні формули та значення параметрів для різних температурних періодів наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Теплофізичні властивості бетону

Теплопровідність, $\lambda(\theta)$, Вт/(м·°С)	Питома теплоємність, $c_p(\theta)$, Дж/(кг·°С)	Густина, кг/м ³
Важкий бетон на силікатному заповнювачі		
$2 - 0,2451 \frac{\theta}{100}$ $+ 0,0107 \left(\frac{\theta}{100} \right)^2$	900 при $0^\circ\text{C} < \theta < 100^\circ\text{C}$, 900 + $(\theta - 100)$ при $100^\circ\text{C} \leq \theta < 200^\circ\text{C}$, 1000 + $12(\theta - 100)$ при $200^\circ\text{C} \leq \theta < 400^\circ\text{C}$, 1100 при $400^\circ\text{C} \leq \theta < 1200^\circ\text{C}$	2300

На рис. 4 показані температурні криві теплофізичних характеристик бетону.

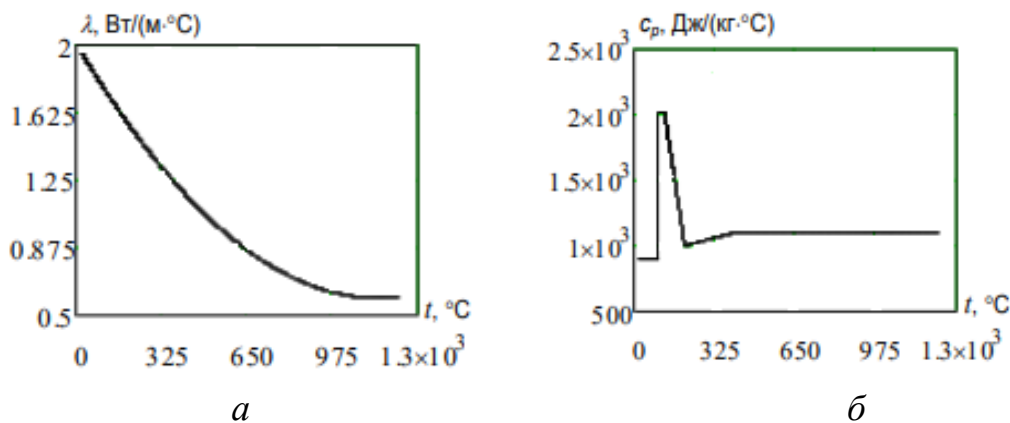


Рисунок 4 – Теплофізичні характеристики бетону сталобетонної колони: *a* – коефіцієнт теплопровідності; *б* – питома теплоємність

Теплофізичні властивості сталеві обійми трубобетонної колони вираховувалися згідно з рекомендаціями, наведеними в частині 2 нормативного документа Eurocode 4 [7]. У цьому стандарті подано температурно залежні характеристики сталі, необхідні для теплотехнічного аналізу конструкції в умовах пожежного впливу. В табл. 3, наведені параметри сталі трубобетонної колони.

Таблиця 3 – Теплофізичні характеристики сталі трубобетонної колони

Теплопровідність, $\lambda(\theta)$, Вт/(м·°С)	Питома теплоємність, $c_p(\theta)$, Дж/(кг·°С)	Густина, кг/м ³
Сталь		
$54 - 3,33 \cdot 10^{-2} \theta$ при $20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 800^\circ\text{C}$, 27,3 при $\theta > 800^\circ\text{C}$.	$425 + 0,773\theta - 1,69 \cdot 10^{-2} \theta^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \theta^3$ при $20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 600^\circ\text{C}$, $666 - 13002/(\theta - 738)$ при $600^\circ\text{C} < \theta \leq 735^\circ\text{C}$, $545 + 17820/(\theta - 731)$ при $735^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}$	7850

На рис. 5 показані температурні криві теплофізичних характеристик сталі.

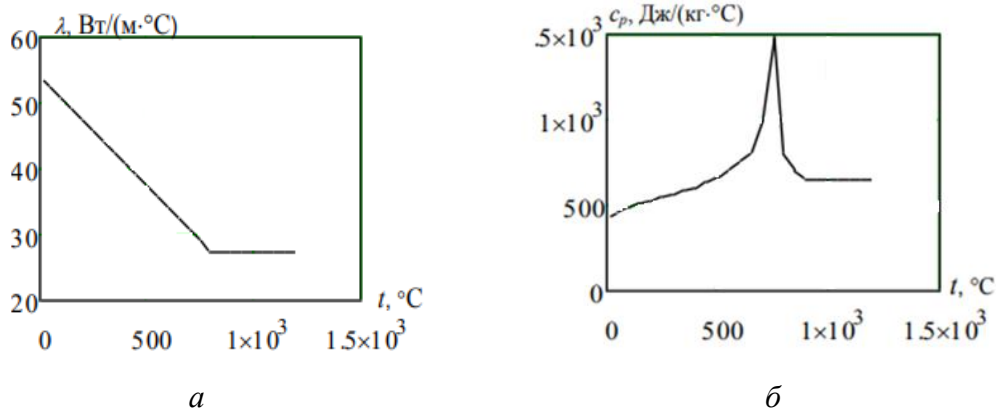


Рисунок 5 – Теплофізичні характеристики сталеві обійми трубобетонної колони: а – коефіцієнт теплопровідності; б – теплоємність

Для проведення числового розрахунку необхідно використати рівняння (4), яке можна апроксимувати при використанні методу скінченних елементів в варіаційній постановці. Для розв’язку нелінійної нестационарної задачі, роздільну систему нелінійних рівнянь записують в матричному вигляді:

$$[\bar{K}(T)]_{\{T\}=\{Q(T)\}}' \quad (4)$$

де:

$[\bar{K}(T)]$ – еквівалентна матриця теплопровідності, що залежить від коефіцієнта теплопровідності матеріалу та об’ємної теплоємності;

$\{Q = (T)\}$ – вектор вузлових теплових потоків, обумовлених тепловим навантаженням пожежі.

В узагальненому вигляді вираз (4) можна записати, як:

$$\{P(T)\} = \{Q(T)\}, \quad (5)$$

де $\{P(T)\}$ – вектор внутрішніх вузлових теплових потоків.

Дана система рівнянь вирішується методом Ньютона-Рафсона, тобто ітераційним методом. При використанні даного методу мінімізується нев'язка:

$$\{\Phi\} \equiv \{Q(T)\} - \{P(T)\} \rightarrow \{0\}. \quad (6)$$

Метод Ньютона-Рафсона ґрунтується на застосуванні усічених рядів Тейлора для залишкового вектора нев'язки. Тому система рівнянь (2) записується у вигляді:

$$\left[\overline{K}_T^{(i-1)}\right] \{\Delta T^{(i)}\} = \{Q^{(i)}\} - \{\overline{P}^{(i)}\}, \quad (7)$$

Виконуються рівноважні ітерації ($i = 1, 2, 3, \dots$), в результаті чого визначаються нові показники температур на кожній ітерації з виразу:

$$\{T^{(i)}\} = \{T^{(i-1)}\} + \{\Delta T^{(i)}\}. \quad (8)$$

Процес виконання ітерацій продовжується до тих пір, поки не досягається прийнятна збіжність.

У рівнянні (4) коефіцієнти дотичної матриці $[K_T]$ з виразів:

$$\left[\overline{K}_T^{(i-1)}\right] \equiv \left(\frac{d\{\Phi\}}{dT}\right)_{i-1}. \quad (9)$$

Розкладання вектора $\{\Phi\}$ в усічений ряд Тейлора має вигляд:

$$\{\Phi^{(i)}\} \simeq \{\Phi^{(i-1)}\} + \left[\overline{K}_T^{(i-1)}\right] \{\Delta T^{(i)}\}, \quad (10)$$

де $\{\Delta T^{(i)}\} = \{T^{(i)}\} - \{T^{(i-1)}\}$ – шуканий вектор прирощення температури для проведення наступної ітерації.

У рівнянні (6) $\{Q(T)\}$ – вектор вузлових теплових потоків, що еквівалентної матриці теплопровідності $[\overline{K}(T)]$.

– еквівалентний вектор вузлових внутрішніх теплових потоків, обумовлений при перевизначенні еквівалентної матриці теплопровідності $[\overline{K}(T)]$, які визначаються шляхом чисельного інтегрування за часом вектора $\{\Delta T^{(i)}\}$ методом Ейлера з використанням виразу:

$$\{T_{n+1}\} - \{T_n\} = \Delta t_n (1 - \zeta) \quad (11)$$

де:

Δt_n – крок інтегрування за часом;

ζ – параметр Ейлера, рівний 0,5, що означає реалізацію за неявною обчислювальною схемою Кранка-Ніколсона.

Еквівалентна матриця теплопровідності $[\overline{K}(T)]$ визначається з виразу:

$$[\overline{K}_n(T)] = \frac{1}{\zeta \Delta t_n} [C_n(T)] + [K_n(T)], \quad (12)$$

де $[C_n(T)]$ і $[K_n(T)]$ – відповідно матриці теплоємностей і коефіцієнтів теплопровідності.

Для визначення $\{Q(T)\}$ використовується вираз:

$$\{Q_n(T)\} = \{Q_{0n}\} + \frac{1-\zeta}{\zeta} [C_n(T)] \{T_n\} - [K_n(T)] \{T_n\}, \quad (13)$$

де $\{Q_{0n}\}$ - вектор зовнішнього заданого теплового потоку, який визначається з виразу:

$$\{Q_{0n}\} = \{Q_n^{\text{конв}}\} + \{Q_n^{\text{випр}}\}. \quad (14)$$

При вирішенні теплотехнічної задачі необхідно визначити поточний вектор конвективного поверхневого вузлового теплового потоку, який визначається за формулою:

$$\{Q_n^{\text{конв}}\} = \alpha_k (\{T_{Wn}\} - \{T_{Pn}\}) A_e. \quad (15)$$

Поточний вектор радіаційного поверхневого вузлового теплового потоку визначається за формулою:

$$\{Q_n^{\text{випр}}\} = \varepsilon \sigma (\{T^{4_{Wn}}\} - \{T^{4_{Pn}}\}) A_e, \quad (16)$$

де:

$\{T_{Wn}\}$ – вектор поверхневих вузлових температур;

$\{T_{Pn}\}$ – вектор, члени якого дорівнюють температури пожежного середовища.

Запропонований метод дозволяє розв'язати теплову задачу та за допомогою методу скінченних елементів одержати температурні розподіли у перерізі сталобетонної колони.

Враховуючи наведені розрахункові схеми, потрібно визначити необхідні параметри для виконання розрахунку. Розрахунок виконується у найбільш небезпечному перерізі у місці, розташованому посередині довжини пілонів. Згідно із цим розглядаємо розрахункову схему силової взаємодії у серединному перерізі сталобетонної колони.

На рис. 6 наведені розподілення температури по перерізу сталобетонної колони на 90 хв розвитку пожежі.

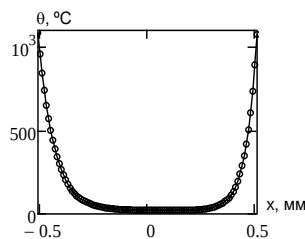


Рисунок 6 – Температурні розподіли у симетричній четвертій колоні на 90 хв розвитку пожежі (°C)

Для оцінки класу вогнестійкості будується графік максимального моменту у колоні, що досліджується із використанням діаграм деформування. Побудований графік моментів від кривизни для колони наведений на рис. 7.

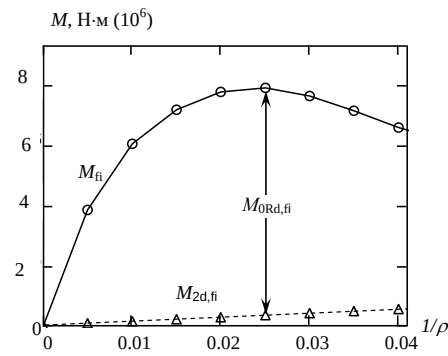


Рисунок 7 – Результати розрахунку максимального моменту у колоні у відповідний час розвитку пожежі за стандартним температурним режимом

Визначаємо виконання умови зберігання несучої здатності за формулою:

$$M_{Rd,fi} > M_{Ed,fi}, \quad (17)$$

Для цього використані дані, наведені на рис. 7 та величини діючих моментів, що визначені за формулою:

$$M_{Ed,fi} = \eta_{fi} M_d, \quad (18)$$

де:

M_d – розрахункове значення відповідного моменту при нормальних температурах;

$\eta_{fi} = 0,7$ – коефіцієнт зниження, що визначає рівень навантаження при пожежі.

Отримані результати наведені у табл. 4.

Таблиця 4 – Максимальний момент у перерізі сталобетонної колони

Досліджуваний елемент (позн.)	Макс. момент за рис. 7, $M_{Rd,fi}$, кНм	Момент за формулою (18), $M_{Ed,fi}$, кНм	Виконання умови (17)
Сталобетонна колона	7549	560	Виконується

Таким чином можна зробити висновок, що сталобетонна колона відповідає класу вогнестійкості R 90.

Висновки.

1. Сталобетонні конструкції поєднують у собі переваги сталевих та залізобетонних елементів: високу несучу здатність, жорсткість, вогнестійкість та довговічність. Завдяки цьому вони широко застосовуються у сучасному будівництві, особливо для багатоповерхових будівель, мостів, промислових споруд.

2. Для дослідження була обрана труобетонна колона Ø1025 сталь С355. Теплофізичні характеристики були обрані відповідно до вимог нормативних документів. Запропоновано, для проведення числового розрахунку, використати метод розв'язку диференціальних рівнянь, який можна апроксимувати при використанні методу скінченних елементів в варіаційній постановці.

Перспективи подальших досліджень. В подальшому для оцінювання вогнестійкості сталобетонних колон необхідно обрати скінчено-елементну схему колони, елементи якої змодельюють бетонний шар та сталеву складову досліджуваної конструкції та провести відповідні розрахунки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Пенц В., Кириченко В. Сталезалізобетонні конструкції для виробничих будівель. Комплексні композитні конструкції будівель та споруд в умовах воєнного стану (CSCS-2022): зб. наук. пр. за матеріалами XIV Міжнародна науково-технічна конференція, 20–22 червня 2022 р. – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2022. С. 40–43. <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/12772>
2. Гвоздь Віктор та ін. Дослідження вогнестійкості елементів сталевих каркасів промислових будівель з врахуванням рівня механічного навантаження. Збірник наукових праць: Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація, Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля 2021, Т.5 № 1. С. 40-49 <https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/85/118>
3. Єфіменко В. Паливода О. Аналіз сучасного стану конструювання будівель зі сталезалізобетонними конструкціями. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2013. Вип. 25. С. 549-554. http://nbuv.gov.ua/UJRN/rmkbs_2013_25_76.
4. С.В. Поздєєв, О.М. Нуязін, С.О. Сідней, А.Ю. Новгородченко, О.В. Борсук, Дослідження нагрівання сталевих двотаврових стержнів із мінераловатним вогнезахисним облицюванням в умовах стандартного температурного режиму пожеж. Геотехнічна механіка. 2020. № 152 с. 116-126
5. Stepanenko V. Study of the influence of the configuration of a small-dimensioned fire installation on the uniformity of heating of the surface of a steel-reinforced concrete slab. Scientific bulletin: Civil protection and fire safety, 1 (2(18)) 2024. P. 4-12. <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/2109543>
6. Yan X., Gernay T. Local buckling of cold-formed high-strength steel hollow section columns at elevated temperatures. Journal of Constructional Steel Research. 2022. Vol. 196. doi: 10.1016/j.jcsr.2022.107403
7. ДСТУ-Н Б EN 1994-1-2:2012 Єврокод 4. Проектування сталезалізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні правила. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість
8. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2005. Єврокод 3, Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість.
9. ДСТУ EN 1363-2:2023 Випробування на вогнестійкість. Частина 2. Альтернативні і додаткові процедури (EN 1363-2:1999, IDT) https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=103325
10. ДБН В.2.6-160:2010 «Сталезалізобетонні конструкції. Основні положення» зі Зміною №1.
11. Поздєєв, С., Некора, О., Федченко, С., Заїка, Н., Шналь, Т., Субота, А., та Несух, М. (2023). Метод визначення міцнісних характеристик бетону залізобетонного ригеля під час нагрівання в умовах пожежі. Східно-Європейський журнал передових технологій, 3 (7 (123)), 26–36. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.282205>

REFERENCES

1. Pents V., Kyrychenko V. Steel-reinforced concrete structures for industrial buildings. Complex Composite Structures of Buildings and Facilities under Martial Law Conditions (CSCS-2022): Collection of Scientific Papers of the 14th International Scientific and Technical Conference, June 20–22, 2022. – Poltava: National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», 2022. – P. 40–43. <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/12772>
2. Hvozdy V. et al. Study of fire resistance of steel frame elements of industrial buildings considering the level of mechanical loading. Collection of Scientific Papers of Cherkasy Institute of

Fire Safety named after Chornobyl Heroes of National University of Civil Protection of Ukraine «Emergency Situations: Prevention and Liquidation», 2021, Vol. 5, №. 1, pp. 40–49. <https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/85/118>

3. Pozdiev S. et al. Study of heating of steel I-beam bars with mineral wool fireproof cladding under standard fire temperature conditions. *Geotechnical Mechanics*, 2020, №. 152, pp. 116–126.

4. Yan X., Gernay T. Local buckling of cold-formed high-strength steel hollow section columns at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*. 2022. Vol. 196. doi: 10.1016/j.jcsr.2022.107403

5. DSTU-N B EN 1994-1-2:2012. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design.

6. DSTU-N B EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design.

7. DSTU EN 1363-2:2023. Fire resistance tests – Part 2: Alternative and additional procedures (EN 1363-2:1999, IDT). https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=103325

8. DBN V.2.6-160:2010 Steel and concrete composite structures. Basic provisions, with Amendment № 1.

9. Pozdieiev, S., Nekora, O., Fedchenko, S., Zaika, N., Shnal, T., Subota, A., Nesukh, M. (2023). Method for identifying the strength characteristics of concrete of a reinforced concrete crossbar during heating under conditions of fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (7 (123)), 26–36. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.282205>

Igor FEDCHENKO

Svetlana FEDCHENKO, PhD

National University of Civil Protection of Ukraine

RESEARCH ON THE BEHAVIOR OF STEEL-CONCRETE COLUMNS IN FIRE CONDITIONS

Steel-concrete is a composite material that combines the high strength of steel with the ductility of concrete. This synergy results in improved performance characteristics, particularly for structures subjected to significant static or dynamic loads under fire conditions.

In modern construction, steel-concrete composite structures have considerable potential, especially in the design of high-rise buildings, bridges, industrial facilities, as well as in post-conflict reconstruction of damaged infrastructure. The combination of steel frame elements and concrete infill not only reduces the size of structural components but also increases their durability, load-bearing capacity, and fire resistance.

The aim of this article is to investigate the behavior of steel-concrete columns under standard fire temperature regimes. The study focuses on analyzing the changes in thermal properties of steel and concrete at elevated temperatures, which significantly affect the load-bearing capacity of the structure. A numerical method based on the finite element approach was used to assess the fire resistance of concrete-filled steel tube (CFST) columns, accounting for the nonlinear behavior of materials over time and space. The research examines the influence of column geometry, cross-sectional shape, and thermal properties of the steel casing on the ultimate performance of the structural element. It was determined that the analyzed CFST column satisfies fire resistance class R 90.

The research findings can be applied in the design of fire-resistant load-bearing elements for critical infrastructure facilities.

Keywords: *steel-concrete, fire resistance, testing, column, composite, temperature.*