

*М.М. Семерак¹, д-р техн. наук, професор, О.В. Некора², канд. техн. наук, с.н.с.,
Д.В. Харишин¹, А.В. Поздєєв², канд. техн. наук, доцент
(¹Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
²Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України)*

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ НАГРІВАННЯ ТРУБОБЕТОННИХ КОЛОН ЗА УМОВ ПОЖЕЖИ

Розроблена методика визначення температурного поля та його зміни в часі при нагріванні колони за стандартним температурним режимом пожежі з врахуванням законів зміни фізико-механічних характеристик бетону і металу. Шляхом математичного моделювання процесу теплообміну між середовищем та труобетонною конструкцією під час пожежі, методом кінцевих елементів спрогнозовано межу досягнення сталевую обіймою критичної температури. Досліджено нестационарне температурне поле по товщині труобетонної конструкції (бетонне ядро-сталева обійма) змодельованої у вигляді двошарового циліндра за умови зміни температури зовнішнього середовища за стандартним температурним режимом пожежі. Результати досліджень представлені графічно.

Ключові слова: температурний режим пожежі, труобетонна конструкція, нестационарне температурне поле, теплообмін, вогнестійкість.

M.M. Semerak, O.V. Nekora, D.V. Kharyshyn, A.V. Pozdyeyev

MATHEMATICAL MODEL OF STEEL TUBE CONFINED CONCRETE PILLAR HEATING IN CONDITIONS OF FIRE

The method of determining the temperature field and its changes in time by heating the pillar in conditions of standard temperature mode, taking into account changes of physical and mechanical properties of concrete and metal, was developed. Mathematical modeling of heat transfer between the environment and steel tube confined concrete pillar in case of fire was made. The time of reaching the critical temperature by the steel ferrule was predicted using the finite elements method. Unsteady temperature field inside STCC pillar (concrete-steel core ferrule) was explored in conditions of standard temperature mode. The pillar was modeled as a two-layer cylinder. The research results were presented graphically.

Key words: fire temperature conditions, steel tube confined concrete pillar, unsteady temperature field, heat, fire.

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку великих міст виникає потреба у зведенні висотних будівель та споруд. Будівництво таких споруд тягне за собою розробку нових об'ємно-планувальних та конструктивних рішень, а також більш ефективні технології, які забезпечать підвищення інтенсивності зведення будівель і їх експлуатаційні та безпекові характеристики. Рішенням цієї проблеми є застосування ефективних несучих елементів, які дадуть змогу зменшити вагу будівель, обсяг будівельних конструкцій, загальних витрат та забезпечать надійність експлуатації будівель у випадку виникнення надзвичайних ситуацій.

Одним з рішень цієї проблеми є застосування будівельних конструкцій з труобетону. Вони являють собою один з небагатьох прикладів, коли бетон і сталь взаємно і істотно підвищують несучу здатність один одного і всього елемента в цілому.

В останні роки для зведення будівель та споруд широко застосовують трубобетонні колони. На рисунку 1 наведені зображення будівель із каркасом на основі трубобетонних колон.

Конструкції з трубобетону є надійними в експлуатації. При будівництві висотних будівель і споруд важливим є той факт, що піддаючись впливу великих деформацій, вони можуть ще тривалий час витримувати значне навантаження, в той час як залізобетонні колони в таких умовах втрачають несучу здатність миттєво (відбувається руйнування бетону – основного несучого елемента).



Рисунок 1 – Приклади будівель із каркасом на основі сталезалізобетонних колон

Повсюдне застосування трубобетонних колон обумовлене їх високою несучою здатністю при порівняно менших габаритних розмірах за рахунок блокування тріщиноутворення у бетоні сталеву обіймою. Також до переваг слід віднести більш спрощені умови їх технології виготовлення та монтажу на їх основі несучих конструкцій перекриття поверхів. При розгляді пожежної безпеки об'єктів будівництва, зведених на основі каркасів із трубобетонних колон можна відмітити, що методи розрахункової оцінки вогнестійкості таких колон розроблені недостатньо. Це підтверджується аналізом робіт присвячених вогнестійкості сталезалізобетонних конструкцій [1,2,3,4,5] та відповідних стандартів для розрахункових методів [6].

На рисунку 2 показана внутрішня конструкція трубобетонної колони.

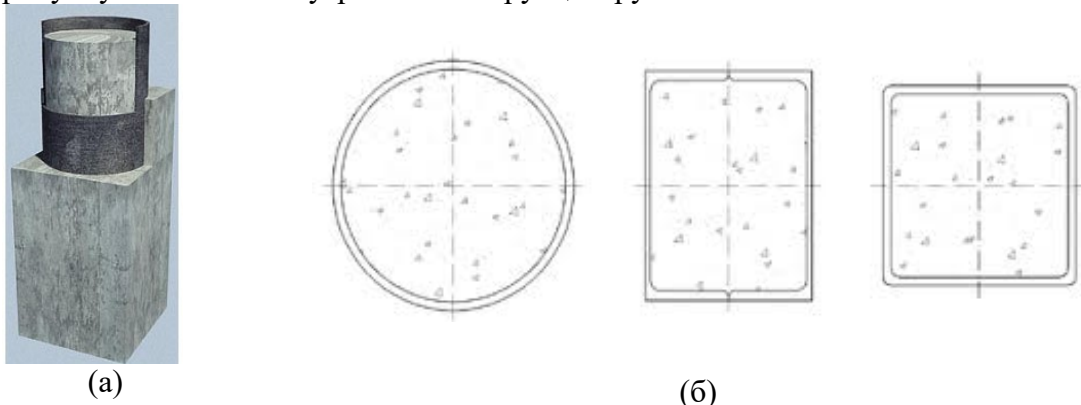


Рисунок 2 – Внутрішня конструкція трубобетонної колони (а) та схема її перерізу (б)

Враховуючи, що стальва труба відіграє ключову роль при забезпеченні несучої здатності трубобетонної колони, її вихід з ладу або зменшення її жорсткості сильно позначається на її роботі в умовах пожежі. Під дією теплового впливу пожежі стальва труба дуже швидко зменшує свою міцність та модуль пружності, оскільки знаходиться на поверхні колони.

Метою роботи є створення методики визначення температурного поля та його змін у часі при нагріванні колони за стаціонарним температурним режимом пожежі з урахуванням законів зміни фізико-механічних характеристик бетону і металу.

Постановка задачі. Згідно із рекомендаціями, наведеними у роботі [4], була визначена конструкція трубобетонної колони без внутрішнього армування. При цьому були визначені основні конструктивні особливості, що наведені нижче.

1. Відсутнє внутрішнє армування.
2. Колона має круглий переріз.
3. Товщина сталевий труби вибирається згідно із рекомендаціями [2,3,4].
4. Закріплення колони з обох кінців є шарнірним (як найбільш небезпечний варіант).
5. До верхнього кінця труби прикладається навантаження, що становить 0,5 від максимального навантаження, враховуючи середній коефіцієнт запасу.

На рисунку 3. наведена структурна схема перерізу колони.

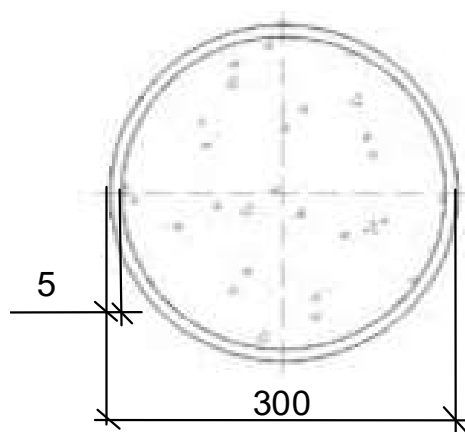


Рисунок 3 – Структурна схема перерізу трубобетонної колони

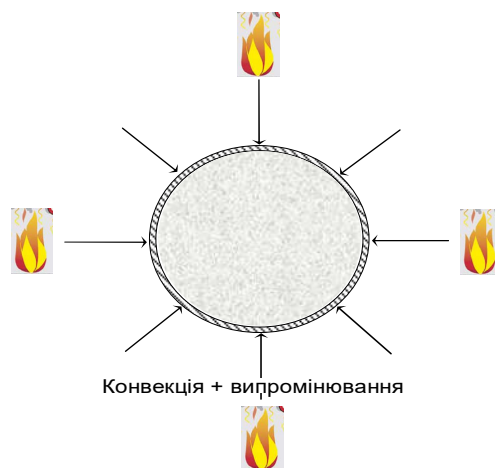


Рисунок 4 – Схема теплового впливу на трубобетонну колону

При проведенні досліджень була прийнята схема теплової дії на трубобетонну колону, що наведена на рисунку 4.

На рисунку 5 наведена розрахункова схема трубобетонної колони.

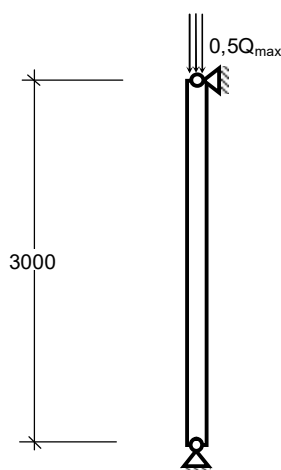


Рисунок 5 – Розрахункова схема трубобетонної колони

Математична модель теплопередачі у трубобетонній колоні при пожежі. Для розрахунку температурних розподілів у перерізі трубобетонної колони, при її роботі в умовах пожежі із стандартним температурним режимом, був застосований узагальнений інженерний підхід, рекомендований у роботах багатьох авторів [3,4, 7,8,9] та розрахункових стандартах [6]. Запропонований підхід має у своїй основі 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 має відповідати стандартній температурній кривій пожежі, що визначається за виразом (5).

3. Теплотехнічна задача розв'язується для розрахункової області, що включає у себе бетон та сталеву обійму.

4. Бетон труобетонної колони має теплофізичні характеристики (ТФХ), які представляються температурними залежностями, згідно із Eurocode 4 EN 1994-1-2: 2004.

5. Рівняння теплопровідності має бути апроксимоване із застосуванням методу кінцевих елементів (МКЕ) з використанням комп'ютерної системи ANSYS Mechanical.

Рівняння теплопровідності записується у вигляді, який поданий нижче [3]

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

де $c_p(\theta)$ – питома теплоємність, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$;

$\lambda(\theta)$ – коефіцієнт теплопровідності, залежний від температури θ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$;

$\rho(\theta)$ – густина, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

θ – температура, $^{\circ}\text{C}$.

Рівняння теплопровідності були доповнені граничними умовами III роду [6,7,8,9], що мають такий вигляд

$$-\lambda(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial r} = \alpha(\theta_p - \theta_w), \quad (2)$$

де θ_w – температура поверхні елемента, $^{\circ}\text{C}$;

θ_p – температура пожежного середовища у пристінковому шарі, $^{\circ}\text{C}$;

α – коефіцієнт теплообміну, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}$.

Коефіцієнт теплообміну має дві складові, які відповідають окремо за конвективний та променистий теплообмін між газовим середовищем пожежі та твердим матеріалом. Для визначення коефіцієнта теплообміну користуються спрощеним інженерним підходом, що має у своїй основі вираз, який поданий нижче

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_k, \quad (3)$$

де α_p – коефіцієнт променевого теплообміну, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}$

За рекомендаціями другої частини EN 1991-1-2 Eurocode 1 [6] складові, відповідні до конвективного та променистого теплообміну можна визначити при використанні таких виразів

$\alpha_k = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ – обігрівна поверхня

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

де $\varepsilon = 0.7$ – ступінь чорноти поверхні бетону [6];

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4)$ – константа Стефана-Больцмана.

Температура пожежної середовища визначається при використанні стандартної температурної кривої, згідно із формулою

$$\theta_p = 20 + 345 \cdot \lg(8t + 1). \quad (5)$$

Для теплотехнічних розрахунків труобетонної колони були прийняті теплофізичні властивості бетону, згідно із другою частиною Eurocode 4 [6]. Цей стандарт рекомендує використовувати для бетону температурні залежності коефіцієнта теплопровідності та питомої теплоємності за формулами, що наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Теплофізичні характеристики бетону трубобетонної колони

Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda(\theta)$, Вт/(м·°С)	Об'ємна питома теплоємність, $c_p(\theta) \cdot \rho$, Дж/(м ³ ·°С)	Густина, кг/м ³
Важкий бетон на силікатному заповнювачі EN 1994-1-2:2012		
$2 - 0,2451 \frac{\theta}{100} + 0,0107 \left(\frac{\theta}{100} \right)^2$	900· при 20 °С ≤ θ ≤ 100 °С, (900+(θ-100)) при 100°С < θ ≤ 200°С, (1000+0,5(θ-100)) при 200°С < θ ≤ 400°С, 1100 при 400°С < θ ≤ 1200°С	2300

Графіки температурних залежностей теплофізичних характеристик бетону наведені на рисунку 6.

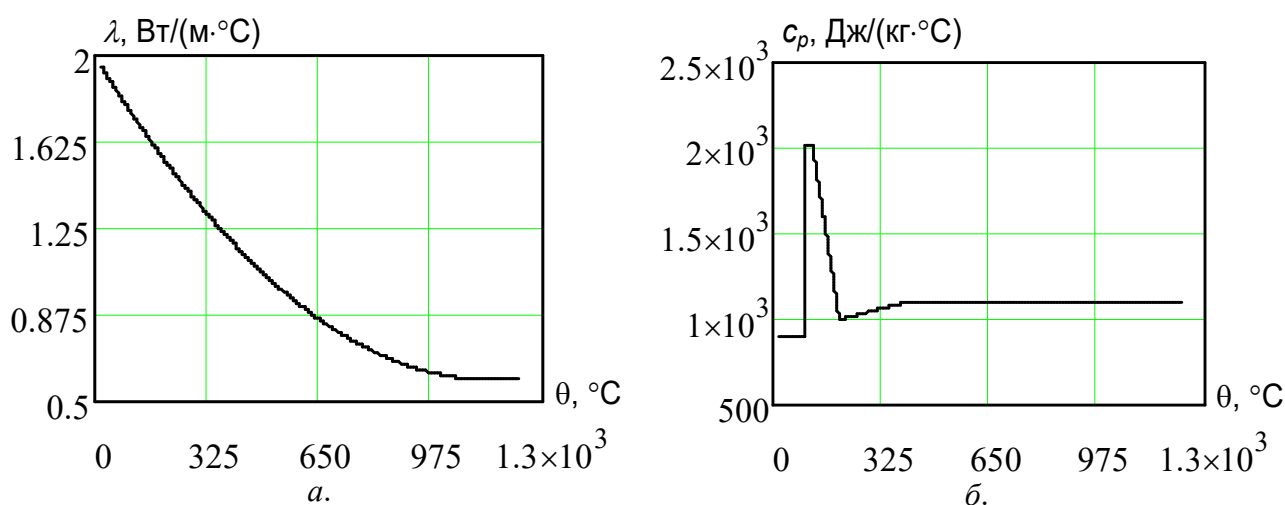


Рисунок 6 – Теплофізичні характеристики бетону: а – коефіцієнт теплопровідності, б – питома теплоємність

Теплофізичні характеристики сталі обойми трубобетонної колони визначаються, згідно із рекомендаціями, наведеними у другій частині Eurocode 4 [6]. В табл. 2 наведені формули, що визначають температурні залежності теплофізичних характеристик.

Таблиця 2

Теплофізичні характеристики сталі трубобетонної колони

Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda(\theta)$, Вт/(м·°С)	Питома теплоємність, $c_p(\theta)$, Дж/(кг·°С)	Густина, ρ_s , кг/м ³
Сталь		
$54 - 3,33 \cdot 10^{-2} \theta$ при 20 °С ≤ θ ≤ 800 °С, 27,3 при θ > 800 °С.	$425 + 0,773 \theta - 1,69 \cdot 10^{-2} \theta^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \theta^3$ при 20 °С ≤ θ ≤ 600 °С, $666 - 13002 / (\theta - 738)$ при 600°С < θ ≤ 735°С, $545 + 17820 / (\theta - 731)$ при 735°С < θ ≤ 900°С, 650 при 900°С < θ ≤ 1200°С	7850

Графіки температурних залежностей теплофізичних характеристик сталі обойми трубобетонної колони наведені на рисунку 7.

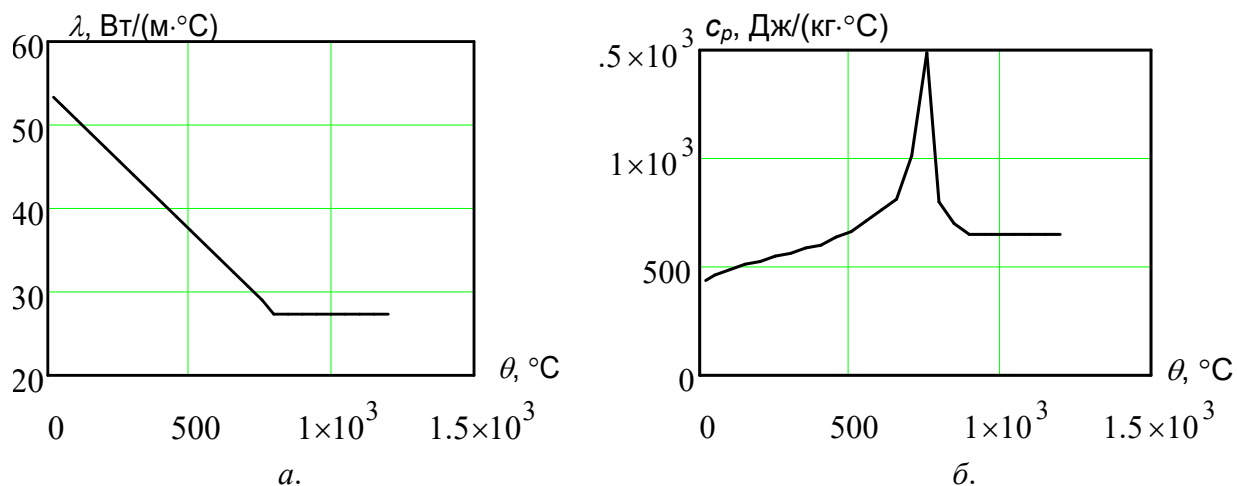


Рисунок 7 – Теплофізичні характеристики сталеві обійми тубобетонної колони: а – коефіцієнт теплопровідності; б – питома теплоємність

Числові параметри виразів (2) – (4), які визначають граничні умови, прийняті згідно з рекомендаціями других частин Eurocode 1 та Eurocode 4 [6]. Прийняті числові параметри зведені до табл. 3.

Таблиця 3

Параметри граничних умов для залізобетонної стіни

Параметр	Позн.	Од.вим.	Вел.	Посилання
Конвективна складова коефіцієнту теплообміну	α_c	Вт/(м ² °С)	25	EN 1991-1-2 Eurocode 1
Ступінь чорноти	ε		0,7	EN 1994-1-2 Eurocode 4

Чисельний метод розв'язку задачі теплопровідності. Вираження для апроксимації рівняння теплопровідності при використанні МКЕ має такий вид:

$$[C_e] \{\theta_e\} + [K_e] \{\theta_e\} = \{Q_e\}, \quad (6)$$

де $[C_e] = \rho \cdot c_p \int_V \{N\} dV$ – матриця розподілення теплоємності кінцевих елементів (КЕ);

$[K_e] = \int_V [B]^T [D] [B] dV$ – матриця розподілення теплопровідності КЕ;

$[B] = \{L\} \{N\} \theta$ – матриця розподілення температур в області, обмеженої КЕ;

$\theta = \{N\}^T \{\theta_e\}$ – температура у середині області, обмеженої КЕ;

$\{\theta_e\}$ – вектор температур у вузлах КЕ;

$[D] = \begin{bmatrix} \lambda_x(\theta) & 0 \\ 0 & \lambda_y(\theta) \end{bmatrix}$ – матриця теплопровідності;

$\{L\} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \right\}^T$ – вектор диференціального оператора;

$\{Q_e\} = q_w \int_s \{N\} ds$ – матриця теплових потоків на границях КЕ;

$\{N\}$ – вектор форми кінцевих елементів, який визначає вигляд інтерполяційних поліномів у середині КЕ.

При апроксимації використовуваного нестационарного рівняння теплопровідності (1) для визначення температурних розподілів має бути записана система нелінійних рівнянь у матричному вигляді, поданому нижче:

$$[K]\{\theta_c\} = \{Q_c\}, \quad (7)$$

де $[K]$ – еквівалентна матриця теплопровідності, що залежить від питомої теплоємності, густини та коефіцієнта теплопровідності бетону та сталеві обійми;

Система рівнянь (4.7) у більш узагальненому вигляді має бути записана як:

$$\{P(\theta)\} = \{Q_c\}, \quad (8)$$

де $\{P(\theta)\}$ – вектор внутрішніх вузлових теплових потоків, який визначається з використанням густини потоків тепла по гранях елемента.

Система нелінійних рівнянь (8) вирішується ітераційним методом, який називається методом Ньютона-Рафсона [10]. Основою обчислювальних процедур цього методу є мінімізація нев'язності, записаної у такому вигляді:

$$\{\Phi\} \equiv \{Q_c\} - \{P(\theta)\} \rightarrow \{0\}. \quad (9)$$

Для реалізації методу Ньютона - Рафсона застосовується усічений ряд Тейлора при записі залишкового вектора нев'язності. Такий запис дозволяє перейти до розв'язку лінійних систем алгебраїчних рівнянь для отримання наближеного розв'язку на певному кроці ітерацій. У цьому випадку систему рівнянь (7) у матричній формі можемо записати:

$$[K_T^{(i-1)}]\{\Delta\theta_c^{(i)}\} = \{Q^{(i)}\} - \{P^{(i)}\}. \quad (10)$$

За таким принципом виконуються рівноважні ітерації ($i = 1, 2, 3, \dots$) і у результаті визначаємо нові значення температур на кожному кроці шляхом використання формули:

$$\{\theta^{(i)}\} = \{\theta^{(i-1)}\} + \{\Delta\theta^{(i)}\}. \quad (11)$$

Процес виконання ітерацій продовжується до досягнення відповідної збіжності, що задовольняє вимоги щодо точності результатів.

У рівнянні (10) коефіцієнти дотичної матриці $[K_T]$ визначаються з виразу

$$[K_T^{(i-1)}] \equiv \left(\frac{d\{\Phi\}}{d\{\theta\}} \right)_{i-1}. \quad (12)$$

При розкладанні вектора $\{\Phi\}$ в усічений ряд Тейлора може бути записана така формула

$$\{\Phi^{(i)}\} \cong \{\Phi^{(i-1)}\} + [K_T^{(i-1)}]\{\Delta\theta^{(i)}\}, \quad (13)$$

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

У рівнянні (10) $\{Q^{(i)}\}$ – вектор вузлових теплових потоків, що розраховується при перезаписі вектора зовнішнього заданого теплового потоку з огляду на підвищення температури за режимом пожежі і відповідними коефіцієнтами теплообміну $\{Q_{0n}\}$ і еквівалентної матриці теплопровідності $[K]$, що є залежною від визначених температур на певному часовому кроці;

$\{\bar{P}\}$ – еквівалентний вектор вузлових внутрішніх теплових потоків, що обчислюється при перезаписі еквівалентної матриці теплопровідності, які визначаються шляхом чисельного інтегрування за часом вектора $\{\Delta\theta^{(i)}\}$ методом Ейлера з використанням виразу

$$\{\theta_{n+1}\} - \{\theta_n\} = \Delta t_n (1 - \zeta) \{\dot{\theta}_n\} + \Delta t_n \zeta \{\dot{\theta}_{n+1}\}, \quad (14)$$

де Δt_n – крок інтегрування за часом;

ζ – параметр Ейлера, рівний 0,5, що означає реалізацію неявної обчислювальної схеми Кранка-Николсона.

Еквівалентна матриця теплопровідності $[K]$ має такий запис

$$[K] = \frac{1}{\zeta \Delta t_n} [C_e] + [K_e], \quad (15)$$

Для перезапису вектора граничних теплових потоків $\{Q(\theta)\}$ використовується вираз

$$\{Q_n(\theta)\} = \{Q_e\} + \frac{1-\zeta}{\zeta} [C_e] \{\dot{\theta}_n\} - [K_e] \{\theta_n\}. \quad (16)$$

Кінцево-елементна схема сталезалізобетонної конструкції для теплотехнічного розрахунку. Для розв'язку задачі теплопровідності за методом кінцевих елементів нами був вибраний гексаедричний KE лагранжевого типу, форма якого представлена на рисунку 8.

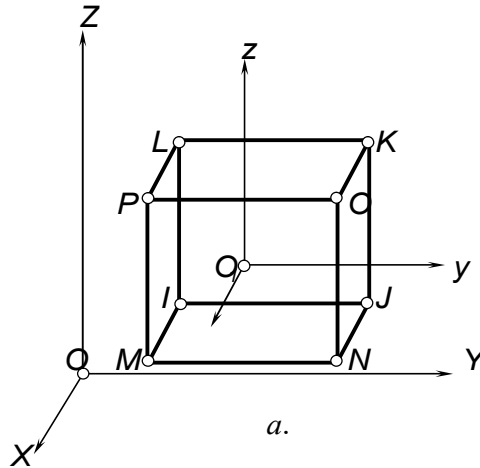


Рисунок 8 – Форма кінцевого елемента

Інтерполяційні поліноми Лагранжа записуються у вигляді виразів [10]

$$\begin{aligned} u_x &= \frac{1}{8} (u_{LX} (1-x)(1-y)(1-z) + u_{KX} (1-x)(1-y)(1-z) + \dots + u_{IX} (1-x)(1-y)(1-z)); \\ u_y &= \frac{1}{8} (u_{LY} (1-x)(1-y)(1-z) + u_{KY} (1-x)(1-y)(1-z) + \dots + u_{IY} (1-x)(1-y)(1-z)); \\ u_z &= \frac{1}{8} (u_{LZ} (1-x)(1-y)(1-z) + u_{KZ} (1-x)(1-y)(1-z) + \dots + u_{IZ} (1-x)(1-y)(1-z)); \end{aligned} \quad (17)$$

У цьому випадку вибраний об'ємний KE у силу специфіки вирішення подібних задач у програмному середовищі ANSYS. Двовимірність досягається тим, що елементи моделюють переріз колони у один шар, як це показано на рисунку 9, де зображена кінцево-елементна схема перерізу трубобетонної колони.

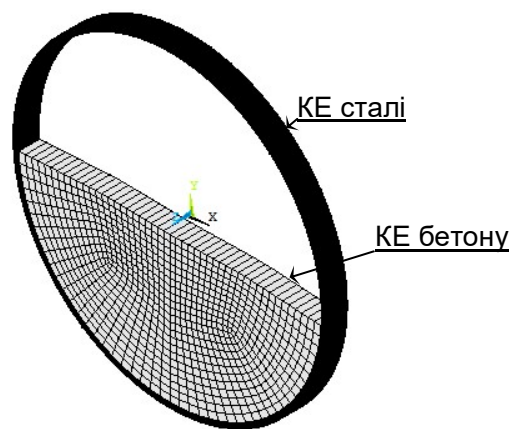


Рисунок 9 – Кінцево-елементна схема трубобетонної колони

Результати розв'язку задачі теплопровідності для трубобетонної колони в умовах пожежі. В результаті вирішення теплотехнічної задачі був отриманий температурний розподіл у перерізі трубобетонної колони, який наведений на рисунку 10. Розподіли на рисунку 10 показують, що найбільш нагрітим елементом перерізу є сталеві обійми.

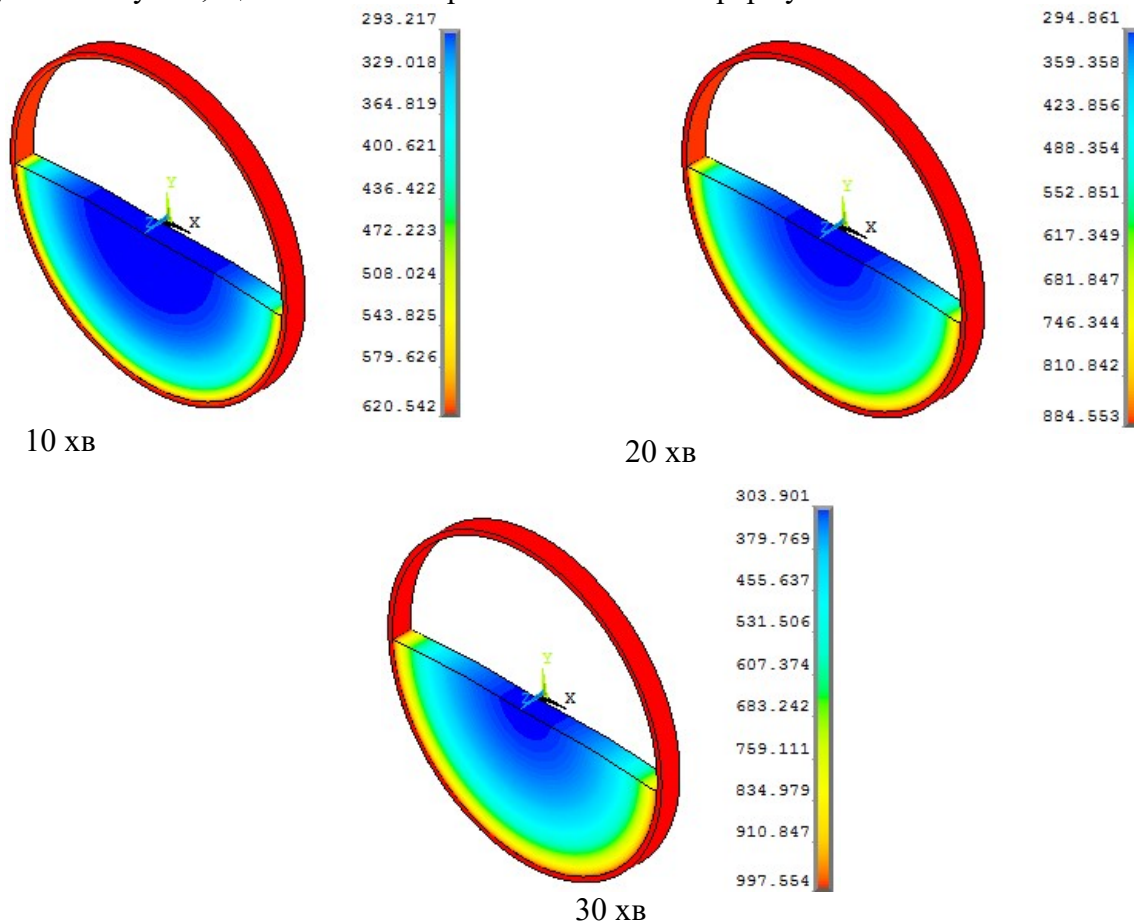


Рисунок 10 – Температурний розподіл у перерізі трубобетонної колони у різні моменти часу розвитку пожежі за стандартним температурним режимом

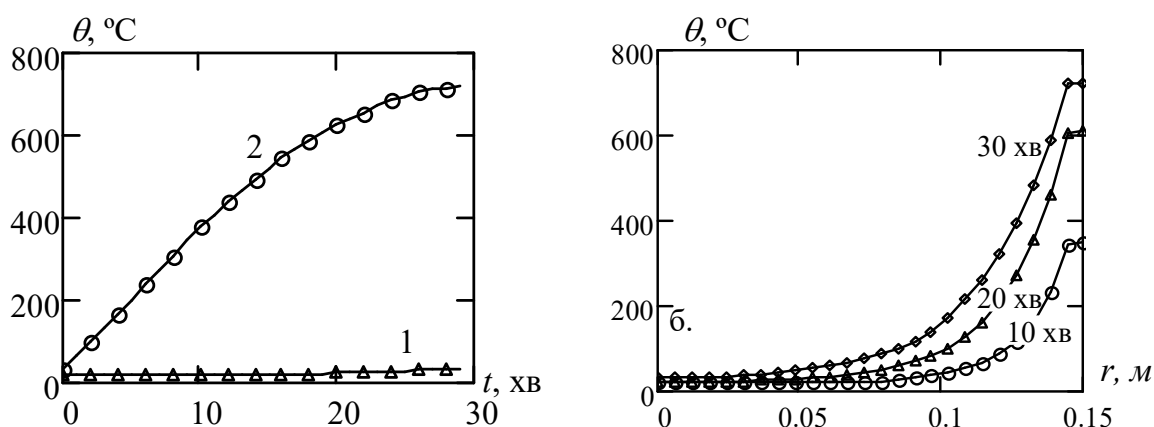


Рисунок 11. – Графіки залежностей температури прогріву різних точок перерізу трубобетонної колони від часу: а – температури прогріву різних точок перерізу трубобетонної колони в умовах пожежі за стандартним температурним режимом у залежності від часу; 1 – середина колони; 2 – обігрівна поверхня сталеві обійми колони, б – розподіл температури по її радіусу у різні моменти часу

Аналіз температури прогрівання трубобетонної колони показав, що її сталеві обійми вже на 15 хв нагріваються до температури 500 °С, що є критичною температурою.

Щоб збільшити межу вогнестійкості трубобетонної конструкції необхідно на поверхню металевої труби нанести вогнезахисну фарбу, що спучується, або вогнезахисну штукатурку.

На рисунку 11б показана зміна температури вздовж радіуса колони в фіксовані моменти часу: 10, 20 і 30 хвилин нагрівання. Аналіз залежності показує, що температура бетонного ядра, яка на поверхні контакту з металевою обіймою дорівнює температурі обійми. Слід зазначити, що перепад температури по товщині металевої обійми (різниця температур між зовнішньою і внутрішньою стінками) становить менше 1%. Як впливає з графіка цей перепад температури майже не змінюється з плином часу.

Висновки

1. Визначена межа вогнестійкості трубобетонної колони без вогнезахисту за несучою здатністю у інтервалі часу впливу пожежі за стандартним температурним режимом від 0 до 30 хв.

2. При визначенні межі вогнестійкості були досліджені температурні розподіли у перерізі трубобетонної колони при її нагріванні за стандартним температурним режимом пожежі і з'ясовано, що межа вогнестійкості залежить від температури нагрівання сталеві оболонки і, як правило, збігається із моментом нагрівання сталеві оболонки до температури 550 °С.

3. Знаючи розподіл температурного поля по товщині трубобетонної конструкції (сталеві оболонка-бетонне ядро), можна дослідити її напружено-деформований стан.

4. Для підвищення вогнестійкості трубобетонних конструкцій їх необхідно захищати вогнезахисними покриттями, що дасть змогу зменшити швидкість нагрівання металевої обійми та зменшити градієнт температури вздовж радіуса бетонного ядра.

5. Зменшення максимальної температури нагрівання трубобетону та градієнта температури вздовж радіуса бетонного ядра призведе до значного зменшення напружено-деформованого стану конструкції, а значить збільшить її вогнестійкість.

Список літератури:

1. Стальные трубчатые конструкции за рубежом. Опыт зарубежного строительства. М., 1968.
2. Стороженко Л.И. Железобетонные конструкции с внешним армированием: Учеб. Пособие К.: УМК ВО, 1989. - 99с.
3. Стороженко Л.И. Объемное напряженно-деформированное состояние железобетона с косвенным армированием: Дисс. докт. техн. наук. Кривой Рог, 1984. - 587 с.
4. Стороженко Л.И. Трубобетонные конструкции. Киев: Будівельник, 1978. – 81с.
5. Семерак М.М. Напружено-деформований стан трубобетонних елементів за умов нагрівання / Семерак М.М., Харишин Д.В.// Пожежна безпека : зб. наук. праць. – 2016. №29. С. 136-141.
6. EN 1994-1-2:2009 Eurocode 2: Design of composite steel and concrete structures Part 1-2: General rules – Structural fire design, Brussels, 2009.
7. Милованов А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций / Милованов А.Ф. – М.: Стройиздат, 1986. – 224 с.
8. Бартелеми Б. Огнестойкость строительных конструкций / Бартелеми Б., Крюппа Ж. – М.: Стройиздат, 1985. – 216 с.
9. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1988. – 144 с.
10. ANSYS, ANSYS 9.0 Manual Set, ANSYS Inc., Southpoint, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, USA.

References:

1. Stal'nyye trubchatyye konstruktsii za rubezhom. Opyt zarubezhnogo stroitel'stva. M., 1968.
2. Storozhenko L.I. Zhelezobetonnyye konstruktsii s vneshnim armirovaniyem: Ucheb. Posobiye K.: UMK VO, 1989. – 99s.
3. Storozhenko L.I. Ob"yemnoye napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye zhelezobetona s kosvennym armirovaniyem: Diss. dokt. tekhn. nauk. Krivoy Rog, 1984. – 587 s.
4. Storozhenko L.I. Trubobetonnyye konstruktsii. Kiyev: Budivel'nik, 1978. – 81 s.
5. Semerak M.M. Napruzhenno-deformovanny stan trubobetonnykh elementiv za umov nahrivannya / Semerak M.M., Kharyshyn D.V.// Pozhezhna bezpeka : zb. nauk. prats'. – 2016. №29. S. 136-141.
6. EN 1994-1-2:2009 Eurocode 2: Design of composite steel and concrete structures Part 1-2: General rules – Structural fire design, Brussels, 2009.
7. Milovanov A.F. Ognestoykost' zhelezobetonnykh konstruktsiy / Milovanov A.F. – M.: Stroyizdat, 1986. – 224 s.
8. Bartelemi B. Ognestoykost' stroitel'nykh konstruktsiy / Bartelemi B., Kryuppa ZH. – M.: Stroyizdat, 1985. – 216 s.
9. Yakovlev A.I. Raschet ognestoykosti stroitel'nykh konstruktsiy. – M.: Stroyizdat, 1988. – 144 s.
10. ANSYS, ANSYS 9.0 Manual Set, ANSYS Inc., Southpoint, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, USA.

