

**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ**

**Львівський державний університет безпеки життєдіяльності**

**ХАРИШИН ДЕМ'ЯН ВАСИЛЬОВИЧ**



УДК 614.841.12:539.377

**ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТА  
ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНУ І МЕТАЛУ НА  
ВОГНЕСТІЙКІСТЬ ТРУБОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ**

21.06.02 – пожежна безпека

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2018

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,  
лауреат Державної премії України  
в галузі науки і техніки, заслужений  
діяч науки і техніки України  
**Семерак Михайло Михайлович**  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
завідувач кафедри теплоенергетики, теплових та  
атомних електричних станцій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Поздєєв Сергій Валерійович**  
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв  
Чорнобиля Національного університету цивільного  
захисту України Державної служби України з  
надзвичайних ситуацій,  
головний науковий співробітник

кандидат технічних наук, доцент  
**Шналь Тарас Миколайович**  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
доцент кафедри будівельних конструкцій та мостів

Захист відбудеться “27” грудня 2018 року о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 35.874.01 у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності за адресою: 79007, м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Львівського державного університету безпеки життєдіяльності за адресою: 79007, м. Львів, вул. Клепарівська, 35

Автореферат розісланий “26” листопада 2018 року

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
к.т.н., доцент



В. М. Баланюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Головним фактором безпеки під час проектування, будівництва чи експлуатації будинків та споруд є їх вогнестійкість. На даному етапі розвитку будівництво зіштовхнулось з такими проблемами як трудомісткість чи неможливість проведення вогневих випробувань та складність теоретичного визначення межі вогнестійкості сучасних залізобетонних конструкцій. Сучасні лабораторії не завжди можуть цілком задовольнити потребу в експериментальних натурних випробуваннях залізобетонних конструкцій на їх вогнестійкість та залишкову несучу здатність після пожежі, особливо у випадках, коли конструкції є громіздкими і мають складну конфігурацію.

Традиційні методи чисельного дослідження вогнестійкості багатошарових конструкцій ґрунтуються на їх випробування за втратою міцності та цілісності в умовах стандартного температурного режиму пожежі. Ці методи ефективно можна застосовувати для певного кола технічних задач, оскільки механізм руйнування багатошарових конструкцій залежить від температурних переміщень та напружено-деформованого стану конструкції в умовах реальної пожежі.

Отже, створення інженерного методу розрахунку межі вогнестійкості багатошарових будівельних конструкцій є актуальною науковою-технічною задачею сьогодення. За останніх 50 років у світовій практиці будівництва зростає тенденція до зведення висотних каркасних будівель на основі трубобетонних конструкцій.

Ґрунтовні роботи зарубіжних учених в області трубобетону, проведені в Західній Європі, США, Китаї, Японії. Експериментальним і теоретичним дослідженням трубобетонних конструкцій (ТБК) присвячені роботи О. А. Долженка, А. І. Кікіна, П. Г. Кортушова, О. І. Лапенка, І. Г. Людковського, В. І. Маракуци, А. Ф. Мареніна, А. І. Міщенко, С. В. Поздєєва, Р. С. Санжаровського, А. А. Сахарова, М. М. Семерака, О. В. Семка, Л. І. Стороженка, В. М. Сурдіна, В. А. Трулля, Е. Д. Чихладзе, О. Л. Шагіна, Т. М. Шналя, І. С. Ярового та інших науковців

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Роботу було виконано відповідно до Концепції Державної цільової соціальної програми забезпечення пожежної безпеки на 2012–2015 р.р., схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 29.12.2010 року № 2348; Державної цільової соціальної програми забезпечення пожежної безпеки на 2012–2015 р.р., затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 27.06.2012 № 590 та в рамках виконання науково-дослідної роботи у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності за науково-дослідною темою «Вогнестійкість трубобетонних конструкцій циліндричної форми за умов пожежі» (номер державної реєстрації 0117U007291) та «Аналіз пожежної небезпеки машинного залу за умови викиду водню з корпусу турбоагрегату енергоблоку №2 ВП ЗАЕС» (0116U003475), у яких дисертант був виконавцем.

**Ідея роботи** полягає у забезпеченні нормованої межі вогнестійкості трубобетонних колон шляхом застосування удосконаленого розрахункового

методу оцінювання класу їх вогнестійкості, заснованого на виявлених залежностях між критичною температурою нагрівання сталевих об'єктів та рівнем навантаження за результатами моделювання з використанням методу кінцевих елементів.

**Мета роботи.** Метою дисертаційної роботи є розкриття закономірностей залежності межі вогнестійкості трубобетонних колон круглого перерізу від їх геометричних характеристик та діючого механічного навантаження в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі як підґрунтя удосконалення спрощеного розрахункового методу її оцінювання.

**Завдання дослідження.** Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- провести аналіз сучасного стану забезпечення і методів оцінювання вогнестійкості трубобетонних колон круглого перерізу та виявити шляхи їх удосконалення;

- розробити методику і провести математичне моделювання поведінки трубобетонних колон із вогнезахистом та без нього за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі;

- розробити методику і провести експериментальні дослідження поведінки трубобетонних колон круглого перерізу за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі;

- провести перевірку адекватності результатів математичного моделювання процесів деформації і руйнування з втратою вогнестійкості трубобетонних колон круглого перерізу шляхом порівняння з даними експериментальних досліджень;

- побудувати математичну модель, та удосконалити на її основі спрощений розрахунковий метод для визначення класу їх вогнестійкості з урахуванням виявленої залежності межі критичної температури сталевих об'єктів трубобетонних колон круглого перерізу від їх геометричних параметрів, параметрів вогнезахисних систем і механічного навантаження;

- перевірити достовірність результатів удосконаленого спрощеного методу оцінювання класу вогнестійкості трубобетонних колон круглого перерізу.

**Об'єкт досліджень** – процеси деформації, руйнування з втратою вогнестійкості, що відбуваються у трубобетонних колонах круглого перерізу в умовах впливу на них стандартного температурного режиму пожежі.

**Предмет досліджень** – закономірності змін значення межі вогнестійкості трубобетонних колон круглого перерізу в залежності від величини температури нагрівання, геометричних параметрів, параметрів вогнезахисних систем і механічного навантаження в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі.

**Методи дослідження.** В роботі було використано комплексний метод дослідження, який включав аналіз і узагальнення науково-технічних досягнень за напрямом вогнестійкості будівельних конструкцій. Для досягнення поставленої мети і вирішення завдань теоретичних досліджень напружено-деформованого стану трубобетонних конструкцій використано теорію термопружності. Дослідження температурного поля вздовж радіуса поперечного перерізу колон

базуються на рівняннях теорії нестационарної теплопровідності, чисельних методах з використанням методу кінцевих елементів, як одного з інструментів спеціальних програмних комплексів. Комп'ютерне моделювання стану трубобетонних будівельних конструкцій в умовах впливу високих температур здійснювалось із використанням комп'ютерного програмного забезпечення Ansys.

Для виконання експериментальних досліджень використовували метрологічно-атестоване обладнання та повірені засоби вимірювання. Результати теоретичних досліджень порівнювались із результатами експериментів аналогічних колон у спеціалізованій випробувальній лабораторії.

**Наукова новизна отриманих результатів** – полягає у розкритті особливостей впливу величини температури нагріву трубобетонних конструкцій, геометричних розмірів та фізико-механічних характеристик металу і бетону на напружено-деформований стан за умов пожежі. При цьому:

- *уперше* шляхом математичного моделювання напружено-деформованого стану з використанням рівнянь термопружності розроблено математичну модель визначення та дослідження напружено-деформованого стану трубобетонних конструкцій за умов пожежі. Розглянуто можливі варіанти компоновки трубобетонних конструкцій та умов їх встановлення на об'єкті;

- *уперше* виявлено закономірність залежності критичної температури, при якій настає втрата несучої здатності трубобетонних колон круглого перерізу за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі, від рівня її навантаження, що має вигляд регресійної поліноміальної залежності.

- *набуло подальшого розвитку* чисельне моделювання вогнестійкості трубобетонних конструкцій за умов стандартного температурного режиму пожежі.

- *удосконалено метод* розрахункової оцінки класу вогнестійкості трубобетонних колон круглого перерізу із вогнезахистом та без нього за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практична цінність дисертаційних досліджень полягає у розробці удосконаленого розрахункового методу оцінювання вогнестійкості трубобетонних колон круглого перерізу в умовах теплового впливу пожежі із стандартним температурним режимом, що дозволяє встановити проектні розміри для забезпечення необхідного класу вогнестійкості та проектні параметри вогнезахисних систем. Це дозволяє уникнути матеріальних та трудових затрат на проведення вогневих випробувань або здійснення великого обсягу розрахунків при використанні уточнених розрахункових методів. Удосконалений спрощений розрахунковий метод оцінювання вогнестійкості трубобетонних колон круглого перерізу може доповнити нормативні документи, що регламентують розрахункові методи оцінки вогнестійкості сталезалізобетонних конструкцій.

Розроблені методики впроваджені в навчальний процес ЛДУБЖД при викладанні дисциплін "Будівельні матеріали та конструкції і їх поведінка в умовах пожежі", "Несуча здатність конструкцій в умовах пожежі" а також у виробничій діяльності Львівської філії ТЗОВ «Укртехнобез» та під час проведення науково-

дослідної роботи «Аналіз пожежної небезпеки машинного залу за умови викиду водню з корпусу турбоагрегату енергоблоку №2 ВП ЗАЕС».

**Особистий внесок здобувача** полягає в самостійному аналізі літературних джерел, формулюванні мети та завдань досліджень, обґрунтуванні методології та виборі методик, у плануванні та безпосередньому проведенні лабораторних випробувань з узагальненням одержаних результатів. Особистий внесок у наукових працях, опублікованих за співавторства, відображено в авторефераті та анотації дисертації. Співавтори за даними дослідженнями дисертації не захищали. Всі основні результати дисертаційного дослідження отримані автором самостійно. Керівник роботи і здобувач спільно зробили постановки задач і загальні висновки.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на 6 всеукраїнських та міжнародних науково-практичних та науково-технічних конференціях, а саме: 17 Всеукраїнській науково-практичній конференції рятувальників "Сучасний стан цивільного захисту України: перспективи та шляхи до Європейського простору" – (Київ, 2015 р.); 18 Всеукраїнській науково-практичній конференції рятувальників "Сучасний стан цивільного захисту України: перспективи та шляхи до Європейського простору" – (Київ, 2016 р.); Міжнародній науково-практичній конференції "Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації" – (Львів, 2016 р.); VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» – (Черкаси, 2017 р.); XI Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених курсантів (студентів), слухачів магістратури та ад'юнктів (аспірантів) – (Мінськ. – 2017 р.); IX Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» – (Черкаси, 2018 р.).

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи було опубліковано 12 наукових праць, в тому числі 6 статей у фахових наукових виданнях, 2 з яких – у закордонних виданнях. Отримані результати апробовано на 6 міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з титульного аркуша, анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 117 найменувань на 12 сторінках; 2 додатків на 8 сторінках. Основна частина дисертації займає 124 сторінки та містить 85 рисунків і 21 таблицю. Загальний обсяг роботи – 165 сторінок.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи та важливість розробки розрахункового методу визначення межі вогнестійкості трубобетонних конструкцій, сформульовано ідею, мету і визначено завдання досліджень, відображено наукову новизну роботи та практичне значення отриманих результатів. Наведено відомості про апробацію та публікування основних результатів дослідження.

У **першому розділі** наведено аналіз наукової літератури щодо дослідження трубобетонних конструкцій та встановлено, що, незважаючи на наявність робіт

багатьох науковців, присвячених експериментальним і теоретичним дослідженням трубобетонних конструкцій, проблема застосування ефективних несучих елементів стає все більш актуальною у зв'язку із наростанням тенденції до зведення висотних будівель і споруд. Також має місце зниження ваги будівель, зменшення обсягу будівельних конструкцій та загальних витрат. Це вимагає застосування стержнів у вигляді стійок і колон, які будуть здатні витримувати значні зусилля при малих поперечних перерізах.

Одним з рішень цієї проблеми є застосування будівельних конструкцій з трубобетону. Однак, незважаючи на сучасні підходи та способи щодо підвищення рівня пожежної безпеки будівель та споруд, кількість пожеж та обсяги збитків від них щорічно зростають і ця тенденція зберігається. Величина матеріальних збитків безпосередньо залежить від інтервалу часу з моменту виникнення пожежі і до втрати вогнестійкості конструкції.

Отже, створення інженерного методу розрахунку межі вогнестійкості багатошарових будівельних конструкцій є актуальною науковою-технічною задачею сьогодення.

Ґрунтовні роботи зарубіжних учених в області дослідження трубобетону проведені в Західній Європі, США, Китаї, Японії. При цьому в літературі відсутні наукові публікації щодо прогнозування межі вогнестійкості ТБК. Під час огляду проаналізовано найбільш поширені конструктивні типи ТБК, їх розміри та характеристики матеріалів, з яких вони виготовлені.

Станом на сьогодні загально визнані інженерні методики розрахунку вогнестійкості трубобетонних конструкцій, що враховують ефект обойми, відсутні. Також недостатньо експериментальних даних щодо роботи трубобетонних конструкцій.

У другому розділі проведено математичне моделювання термонапруженого стану трубобетонних конструкцій за умов стаціонарної теплопровідності.

Огляд наукової літератури показав, що кусково-однорідні циліндричні конструкції досліджуються у випадках, коли циліндр пустотілий та суцільний.

Диференціальне рівняння для знаходження переміщень  $u$  вздовж радіуса  $r$  має вигляд:

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_t \frac{dt}{dr}. \quad (1)$$

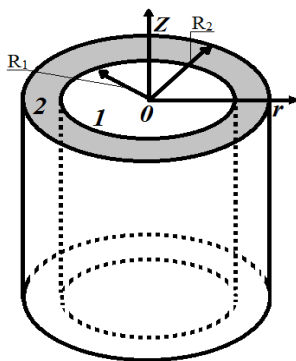


Рисунок 1 – Розрахункова схема ТБК

Розглянуто трубобетонну колону, яка складається з сталеві обойми, що заповнена бетоном, зовнішній радіус якої  $R_2$ , а внутрішній  $R_1$ . Для аналітичних досліджень вибрано циліндричну систему координат, центр якої поміщено у центрі поперечного перерізу колони (рис. 1). Температурне поле колони симетричне відносно осі циліндра і постійне за всією довжиною.

Для дослідження впливу зміни температури на міцність колони використаємо узагальнений закон Гука, враховуючи деформації, зумовлені температурою, і запишемо рівняння для визначення напружень.

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[ (1-\nu)\varepsilon_r + \nu\varepsilon_\varphi + \nu\varepsilon_z - (1+\nu)\alpha t \right], \\ \sigma_\varphi &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[ (1-\nu)\varepsilon_\varphi + \nu\varepsilon_r + \nu\varepsilon_z - (1+\nu)\alpha t \right], \\ \sigma_z &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[ (1-\nu)\varepsilon_z + \nu\varepsilon_r + \nu\varepsilon_\varphi - (1+\nu)\alpha t \right],\end{aligned}\quad (2)$$

де  $\varepsilon_r, \varepsilon_\varphi, \varepsilon_z$  – відносні переміщення точок поперечного перерізу колони вздовж осей  $r, \varphi, z$ ;  $\sigma_r, \sigma_\varphi, \sigma_z$  – радіальні, кільцеві і осьові температурні напруження відповідно, Па;  $E$  – модуль пружності, Па;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  $\alpha_t$  – температурний коефіцієнт лінійного розширення,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $t_0$  – початкова температура колони,  $^\circ\text{C}$ ;  $t$  – температура нагрівання колони,  $^\circ\text{C}$ .

Загальний розв'язок рівняння для визначення переміщень має вигляд:

$$u = A + \frac{B}{r} + \frac{1}{r} \frac{1+\nu}{1-\nu} \int_a^r \alpha_t t r dr. \quad (3)$$

де  $A$  і  $B$  – сталі інтегрування, які знаходяться з граничних умов.

Якщо трубобетонна колона нагріта на деяку постійну величину  $\Delta t = t - t_0$ , то вираз (3) можна подати у вигляді:

$$u_i = A_i + \frac{B_i}{r}$$

Після проведення математичних перетворень рівняння (2) мають вигляд:

$$\begin{aligned}\sigma_{r(i)} &= \frac{E_i}{(1+\nu_i)(1-2\nu_i)} \left[ A_i - \frac{B_i}{r^2} (1+2\nu_i) - (1+\nu_i)\alpha_{t(i)}\Delta t \right], \\ \sigma_{\varphi(i)} &= \frac{E_i}{(1+\nu_i)(1-2\nu_i)} \left[ A_i + \frac{B_i}{r^2} (1-2\nu_i) - (1+\nu_i)\alpha_{t(i)}\Delta t \right], \\ \sigma_{z(i)} &= \frac{E_i}{(1+\nu_i)(1-2\nu_i)} \left[ 2\nu_i A_i - (1+\nu_i)\alpha_{t(i)}\Delta t \right],\end{aligned}\quad (4)$$

де  $i = 1, 2$  – відповідно 1-й і 2-й шар конструкції з відповідними фізико-механічними характеристиками.

При розрахунках трубобетонної колони як кусково-однорідної конструкції необхідно дотримуватись умов, що радіус  $r$  змінюється в інтервалі:

1. В області 1, заповненій бетоном:  $0 \leq r < R_1$ .
2. В області 2 за товщиною зовнішньої труби.  $R_1 \leq r \leq R_2$ .

Для знаходження сталих інтегрування  $A_i$  і  $B_i$  ( $i=1, 2$ ) записано граничні умови:

$$1) u_1 = u_2 \text{ при } r=R_1; \quad 2) \sigma_r^{(1)} = \sigma_r^{(2)} \text{ при } r=R_1, \quad (5)$$

$$3) u_1 = 0 \text{ при } r=0; \quad 4) \sigma_r^{(2)} = 0 \text{ при } r=R_2. \quad (6)$$

Враховуючи вирази (3) і (4) та умови (5), (6) одержали систему із шести рівнянь для знаходження шести невідомих  $A_i$  і  $B_i$  ( $i=1, 2$ ). Розв'язок системи одержаний методом Крамера за допомогою програми MathCAD.

При дослідженнях прийнято такі характеристики  $R_1=0,49$  м;  $R_2=0,5$  м;  $\nu_1=0,17$ ;  $\nu_2=0,3$ ;  $E_1=2,1 \cdot 10^{10}$ , Па;  $E_2=2,1 \cdot 10^{11}$ , Па;  $\alpha_t^{(1)}=12 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_t^{(2)}=14 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ .

За формулами (4) проведені дослідження напружено-деформованого стану ТБК. При дослідженні прийнято, що температура в колоні змінюється на величину  $t_c=300^\circ\text{C}$  і  $t_c=500^\circ\text{C}$ . Результати числового експерименту зображено графічно на рис. 2



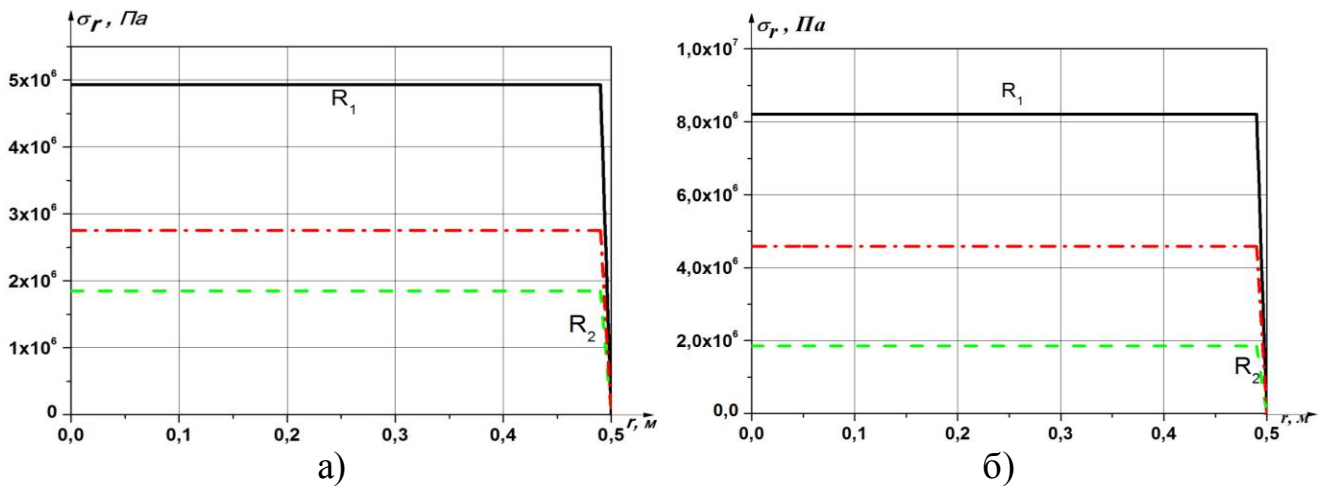


Рисунок 2 – Зміна величини радіальних температурних напружень вздовж радіуса поперечного перерізу двошарової ТБК (а) при  $t_c=300^\circ\text{C}$ ; б)  $t_c=500^\circ\text{C}$ ): – суцільною лінією показано зміну напружень при вказаних вище характеристиках сталі і бетону; – штриховою лінією показано зміну напружень при рівних значеннях  $\alpha_t$  ( $\alpha_t^{(1)} = \alpha_t^{(2)} = 12 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ); – штрихпунктирною лінією показана зміна напружень при рівності коефіцієнтів Пуассона ( $\nu_1 = \nu_2 = 0,2$ )

Аналіз графічних залежностей показує, що в центральному стержні (бетонне ядро) в усіх випадках виникають напруження розтягу, які є постійними вздовж радіуса. По товщині зовнішньої труби виникають розтягуючі напруження. На внутрішній поверхні вони рівні з напруженнями в бетоні. При наближенні до зовнішньої поверхні вони зменшуються і на поверхні  $r=R_2$  дорівнюють нулеві.

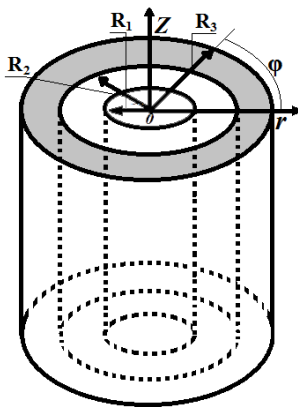


Рисунок 3 – Схематичне зображення ТБК (сталева обойма-бетонне ядро-отвір)

Також розглянуто пустотілу трубобетонну колону, схему якої наведено на рис. 3. Температурне поле колони постійне по всій довжині.

При розрахунках трубобетонної колони, як кусково-однорідної конструкції, необхідно дотримуватись умов, що радіус  $r$  змінюється в інтервалі:

1. В області пустотілій:  $0 \leq r < R_0$ .
  2. В області заповненій бетоном:  $R_0 \leq r < R_1$ .
  3. В області по товщині зовнішньої труби:  $R_1 \leq r \leq R_2$ .
- Для визначення сталих інтегрування  $A_i$  і  $B_i$  ( $i=1, 2$ ) записано граничні умови:

$$1) \sigma_r^{(2)}=0 \text{ при } r=R_2; 2) \sigma_r^{(1)}= \sigma_r^{(2)} \text{ при } r=R_1, \quad (7)$$

$$3) \sigma_r^{(1)}=0 \text{ при } r=R_0; 4) u_1=u_2 \text{ при } r=R_1; \quad (8)$$

Для даного випадку проводились аналогічні розрахунки, як і для трубобетонної колони, яка складається з сталевий обойми, що заповнена бетоном. Отримано результати, які приведені на графіках (рис. 4).

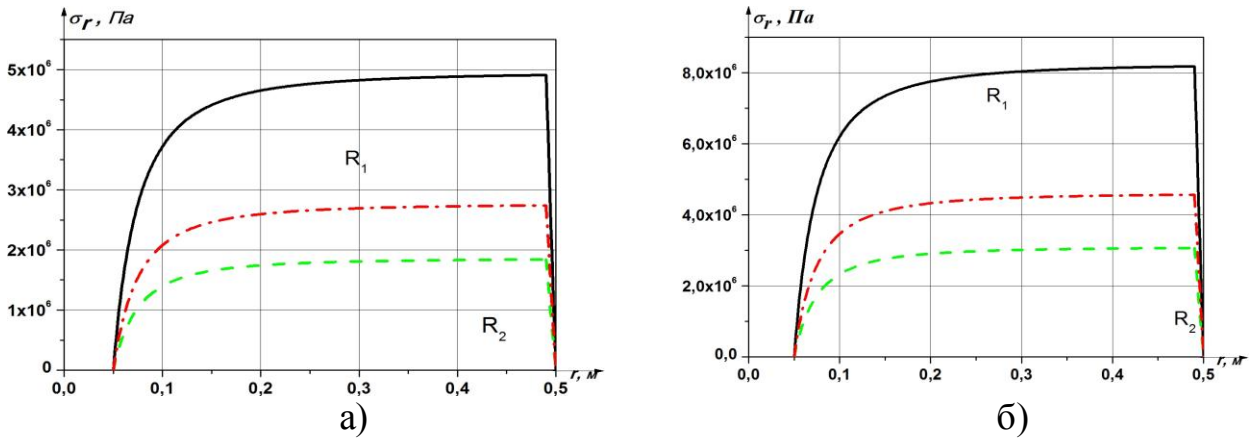


Рисунок 4 – Зміна величини радіальних температурних напружень вздовж радіуса поперечного перерізу трьохшарової ТБК (а) при  $t_c=300^\circ\text{C}$ ; б)  $t_c=500^\circ\text{C}$ ): - суцільною лінією показано зміну напружень при вказаних вище характеристиках сталі і бетону; - штриховою лінією показано зміну напружень при рівних значеннях  $\alpha_t$  ( $\alpha_t^{(1)} = \alpha_t^{(2)} = 12 \cdot 10^{-6} 1/\text{K}$ ); - штрих пунктирною лінією показана зміна напружень при рівності коефіцієнтів Пуассона ( $\nu_1 = \nu_2 = 0,2$ )

Аналіз графічних залежностей показує, що в усіх випадках у бетоні виникають напруження розтягу, які є зростаючими вздовж радіуса. По товщині зовнішньої труби виникають розтягуючі напруження. На внутрішній поверхні вони рівні з напруженнями в бетоні. При наближенні до зовнішньої поверхні вони зменшуються і на поверхні  $r=R_2$  дорівнюють нулеві.

Розглянемо труобетонну колону, яка складається з металеві труби радіусом  $R_3$  заповненої бетоном і арматури радіусом  $R_1$  розміщеної вздовж центральної осі  $z$ . При дослідженнях прийнято наступні характеристики  $R_1=0,05$  м;  $R_2=0,49$  м;  $R_3=0,5$  м;  $\nu_1=0,3$ ;  $\nu_2=0,17$ ;  $\nu_3=0,3$ ;  $E_1=2,1 \cdot 10^{11}$ , Па;  $E_2=2,1 \cdot 10^{10}$ , Па;  $E_3=2,1 \cdot 10^{11}$ , Па;  $\alpha_t^{(1)} = \alpha_t^{(3)} = 14 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_t^{(2)} = 12 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ .

Знайдені числові значення  $A_i$  і  $B_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) підставлено в рівняння (4) і знайдено значення температурних напружень. Результати числового експерименту зображено графічно на рис. 5.

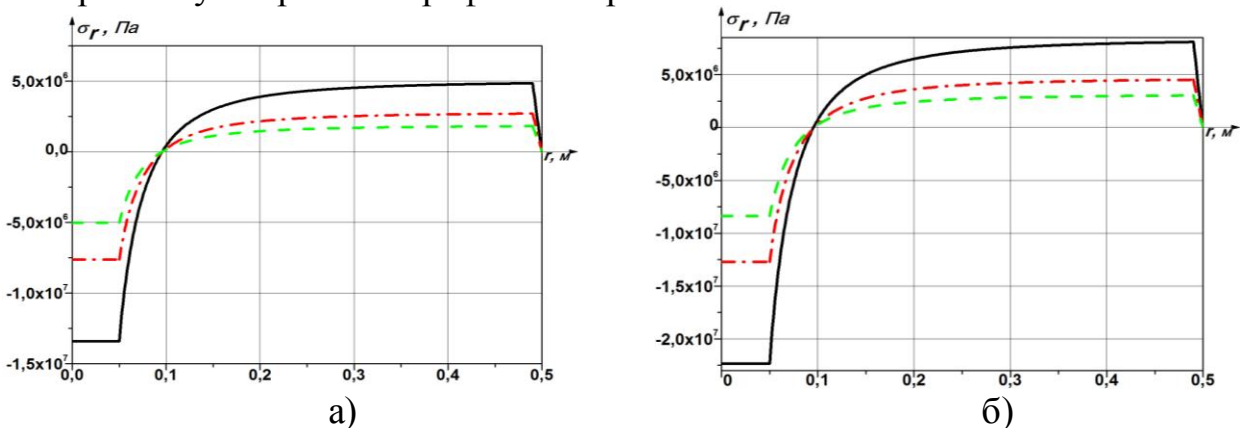


Рисунок 5 – Зміна величини радіальних температурних напружень вздовж радіуса поперечного перерізу трьохшарової колони з металевим стержнем (а) при  $t_c=300^\circ\text{C}$ ; б)  $t_c=500^\circ\text{C}$ ): - суцільною лінією показано зміну напружень при вказаних вище характеристиках сталі і бетону; - штриховою лінією показано зміну напружень при рівних значеннях  $\alpha_t$  ( $\alpha_t^{(1)} = \alpha_t^{(2)} = \alpha_t^{(3)} = 12 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ); - штрих пунктирною лінією показана зміна напружень при рівності коефіцієнтів Пуассона ( $\nu_1 = \nu_2 = \nu_3 = 0,2$ )

Аналіз графічних залежностей показує, що у центральному стержні в усіх випадках виникають напруження на стиск, які є постійними вздовж радіуса. У бетоні на поверхні контакту з центральним металевим стержнем напруження рівні напруженням в металі. Із збільшенням біжучого радіуса напруження з області стиску переходять в область розтягу і найбільших значень досягають на границі контакту із зовнішньою трубою. По товщині зовнішньої труби виникають напруження на розтяг. На внутрішній поверхні вони рівні з напруженнями в бетоні. При наближенні до зовнішньої поверхні вони зменшуються і на поверхні  $r = R_3$  дорівнюють нулеві.

У випадку, коли коефіцієнти лінійного розширення  $\alpha_t$  ( $i=1, 2, 3$ ) рівні між собою (штрихова лінія), максимальні стискаючі напруження в області 1 зменшуються на 43%, а розтягуючі напруження в областях 2 і 3 також зменшуються на 62%. При рівних  $\nu_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) (штрихпунктирна лінія) напруження зменшуються на 43% в області 1, 2, 3.

У **третьому розділі** досліджено розподіл нестационарного температурного поля за умов дії стандартного температурного режиму пожежі. Для розрахунку температурного розподілу у поперечному перерізі ТБК при пожежі із стандартним температурним режимом застосовано узагальнений інженерний підхід, який рекомендовано у роботах багатьох авторів та розрахункових стандартах. Запропонований підхід має такі основні положення:

1. При розрахунку використано рівняння теплопровідності з граничними умовами III роду для конвекційного і променевого теплообміну з середовищем пожежі із врахуванням температурно-залежних параметрів, таких як коефіцієнт теплопровідності, питома теплоємність та густина. Схема теплового впливу та кінцево-елементна схема приведена на рис. 6 та рис. 7.



Рисунок 6 – Схема теплового впливу на ТБК

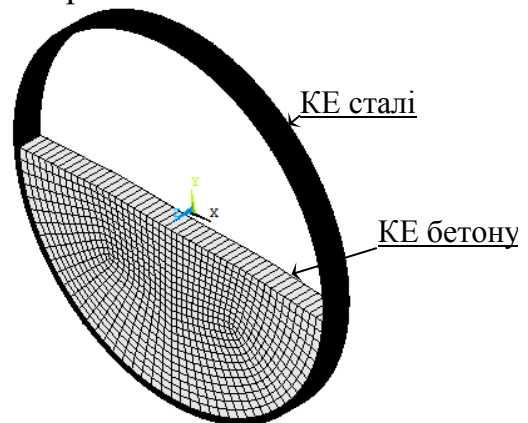


Рисунок 7 – Кінцево-елементна схема трубобетонної колони

Рівняння теплопровідності записано у вигляді, який подано нижче:

$$c_p(\theta)\rho(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial y}\right), \quad (9)$$

де  $c_p(\theta)$  – питома теплоємність, залежна від температури  $\theta$ , Дж/(кг·°С);  $\lambda(\theta)$  – коефіцієнт теплопровідності, залежний від температури  $\theta$ , Вт/(м·°С);  $\rho(\theta)$  – густина, залежна від температури  $\theta$ , кг/(м<sup>3</sup>);  $\theta$  – температура, °С.

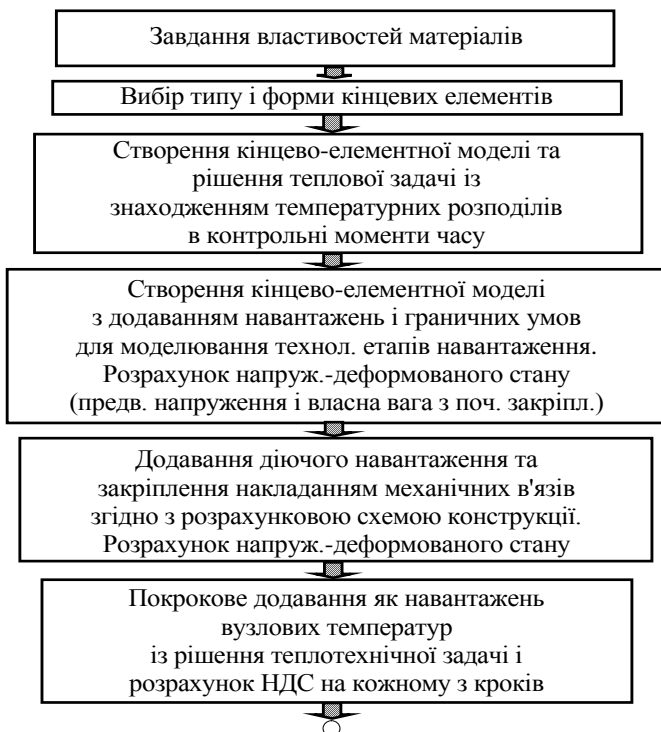
Для теплотехнічних розрахунків трубобетонної колони були прийняті теплофізичні властивості бетону згідно із другою частиною Eurocode 4.

2. Температурний режим пожежного середовища відповідає стандартній температурній кривій пожежі.

3. Теплотехнічна задача розв'язується для розрахункової області, що включає у себе тільки бетон та сталеву обойму, оскільки арматурні стержні мають суттєво менші геометричні розміри у перерізі та значно більший коефіцієнт теплопровідності, ніж бетон.

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

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



*Рисунок 8 – Структурна схема розрахункових процедур щодо визначення параметрів напружено-деформованого стану трубобетонної колони*



*Рисунок 9 – Структурна схема визначення межі вогнестійкості за розрахованими параметрами напружено-деформованого стану*

За даною методикою (див. рис. 8 та рис. 9) визначено межу вогнестійкості трубобетонної колони без вогнезахисту за втратою несучої здатності у інтервалі часу впливу пожежі із стандартним температурним режимом від 0 до 30 хв.

Для дослідження впливу механічного навантаження на ТБК були проведені дослідження впливу стандартного температурного режиму пожежі при різних значеннях прикладеного навантаження. Результати наведено на рис. 10 у вигляді графіків залежності максимального переміщення верхнього кінця трубобетонної колони від часу її експонування в умовах стандартного температурного режиму пожежі при різних умовах навантаження.

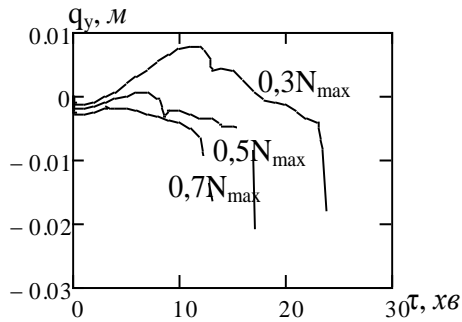


Рисунок 10 – Графіки максимального переміщення верхнього кінця труботонної колони у залежності від часу її експонування в умовах пожежі

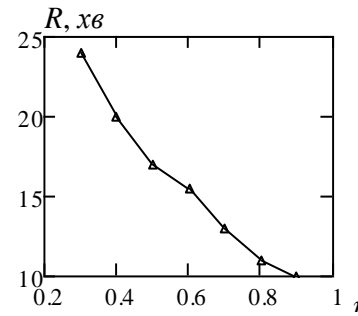


Рисунок 11 – Графіки межі вогнестійкості труботонної колони у залежності від рівня її навантаження

За графіками, наведеними на рис. 10, визначено настання граничного стану втрати несучої здатності.

Відповідно до отриманих даних можна побачити, що межа вогнестійкості для всіх рівнів навантаження складає щонайбільше 24 хв. Тобто досліджувані труботонні колони мають клас вогнестійкості не більший за R 15. Такий клас вогнестійкості явно недостатній для забезпечення I та II ступеня вогнестійкості згідно із стандартом України. Для забезпечення необхідного класу вогнестійкості необхідно застосовувати вогнезахисні системи.

Кінцево-елементні схеми для розв'язку теплотехнічної задачі труботонної колони із різними типами вогнезахисних систем показано на рис. 12. Дані схеми відповідають розрахунковій схемі колони, яку наведено на рис. 6.

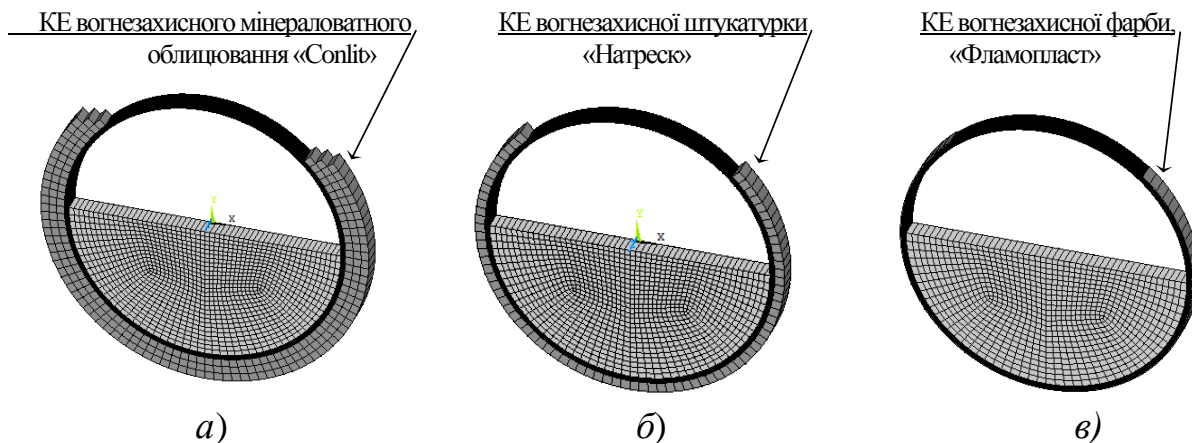


Рисунок 12 – Кінцево-елементні схеми труботонної колони із різними вогнезахисними системами:

а) «Conlit SL150»; б) «Напекс»; в) «Pyro-Safe Flammoplast SP-A2»

До побудованих кінцево-елементних схем додано граничні умови у відповідності зі схемами, наведеними на рис. 6. Після їх побудови проведено розрахунки температурних розподілів у колоні протягом максимального регламентованого часу 180 хв.

Досліджено межі вогнестійкості трубобетонної колони із вогнезахисними системами на основі мінераловатних плит «Conlit SL150», вогнезахисної штукатурки «Натреск» та вогнезахисної фарби, що спучується «Pyro-Safe Flammoplast SP-A2».

Температурні розподілення у перерізі трубобетонної колони із вогнезахисною системою «Pyro-Safe Flammoplast SP-A2» наведено на рис.13. При застосуванні вогнезахисних систем на основі мінераловатних плит «Conlit SL150» та вогнезахисної штукатурки «Натреск» клас вогнестійкості трубобетонної колони підвищується з R 15 до R 180, а при застосуванні вогнезахисної системи на основі вогнезахисної фарби, що спучується, «Pyro-Safe Flammoplast SP-A2» – підвищується з R 15 до R 90.

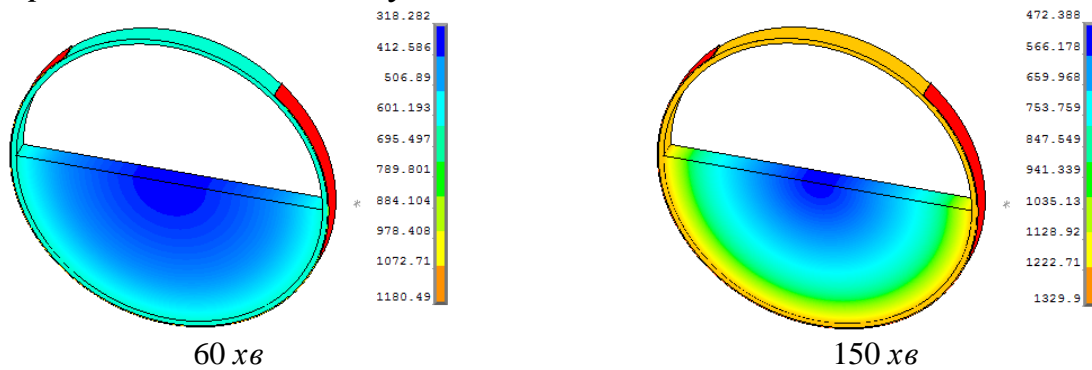


Рисунок 13 – Температурні розподілення у перерізі трубобетонної колони із вогнезахисною системою «Pyro-Safe Flammoplast SP-A2» у різні моменти часу розвитку пожежі із стандартним температурним режимом

На рис. 14 наведені графіки прогріву внутрішніх шарів колон.

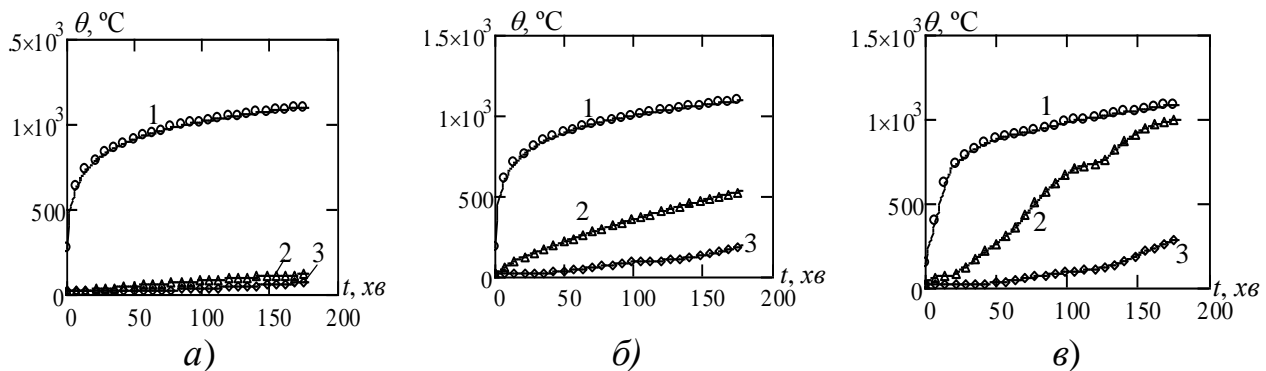
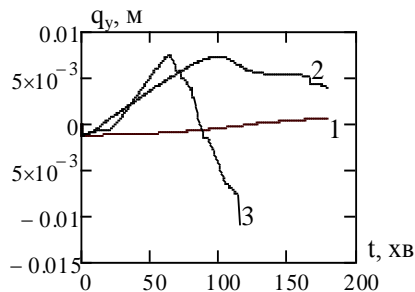


Рисунок 14 – Температурні режими нагріву поверхні колони (1), сталеві оболонки (2), середини бетонної основи колони (3) із різними вогнезахисними системами: а) – «Conlit SL150»; б) – «Натреск»; в) – «Pyro-Safe Flammoplast SP-A2»

Графіки на рис. 14 показують, що найбільш ефективною є вогнезахисна система на основі мінераловатних плит «Conlit SL150», оскільки температура сталеві оболонки колони не піднімається вище 200 °С. Дещо меншим вогнезахисним ефектом володіє система на основі вогнезахисної штукатурки «Натреск». При застосуванні цієї системи температура сталеві оболонки не піднімається вище 510 °С. Найменший вогнезахисний ефект спостерігається для системи на основі вогнезахисної фарби, що спучується «Pyro-Safe Flammoplast SP-A2».

Після проведених розрахунків отримано набір даних щодо напружено-деформованого стану трубобетонної колони із вогнезахистом в умовах нагріву за стандартним температурним режимом пожежі. Для визначення межі вогнестійкості побудовано графіки максимального переміщення верхнього кінця колони (рис. 15).

Проаналізувавши графіки переміщення верхнього кінця трубобетонних колон із різними вогнезахисними системами в умовах впливу пожежі, було виявлено, що для колон із системами «Conlit SL150» та «Натреск» межа вогнестійкості за втратою несучої здатності не настає, а для системи на основі вогнезахисної фарби, що спучується, «Pyro-Safe Flammoplast SP-A2» настає на 115 хв. Вогнезахисні системи на основі мінераловатних плит «Conlit SL150» та вогнезахисної штукатурки «Натреск» підвищують клас вогнестійкості трубобетонної колони з R 15 до R 180. При застосуванні вогнезахисної системи на основі вогнезахисної фарби, що спучується, «Pyro-Safe Flammoplast SP-A2» клас вогнестійкості підвищується з R 15 до R 90.



*Рисунок 15 – Графіки переміщення верхнього кінця трубобетонної колони протягом 180 хв впливу пожежі із стандартним температурним режимом при застосуванні різних захисних систем: 1 – «Conlit SL150»; 2 – «Натреск»; 3 – «Pyro-Safe Flammoplast SP-A2»*

**У четвертому розділі** наведено методику та результати стандартних вогневих випробувань, метою яких було вивчення температурних розподілів у перерізі трубобетонних колон з використанням відповідного стандарту, чинного в Україні. Випробування проводилось у сертифікованій вогневій печі (рис. 16).

Нагрівання у печі відбувалось за допомогою форсунок, факели яких формувались у нагрівальних каналах. Зразок для випробування являв собою трубобетонну колону круглого перерізу діаметром 325 мм і довжиною 3000 мм. (рис. 17).



*Рисунок 16 – Загальний вигляд установки для випробувань*



*Рисунок 17 – Вигляд трубобетонних колон-зразків після проведення вогневих випробувань*

Для визначення розподілу температури у перерізі колони-зразка під час випробувань у її внутрішніх шарах було встановлено необхідну кількість термопар. Схему розташування термопар у перерізі трубобетонної колони-зразка представлено на рис. 18.

Температура сталеві обійми контролювалася на трьох рівнях. Температура у певній контрольній точці сталеві обійми визначалася як середнє значення температур на кожному з рівнів згідно рис. 19.

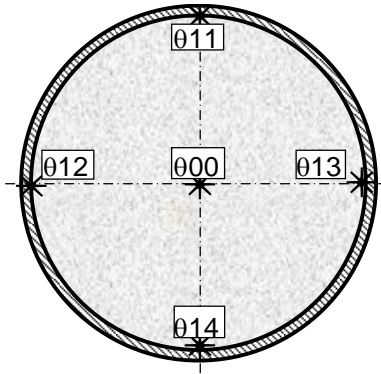


Рисунок 18 – Схема розташування термопар у перерізі трубобетонної колони-зразка для випробувань

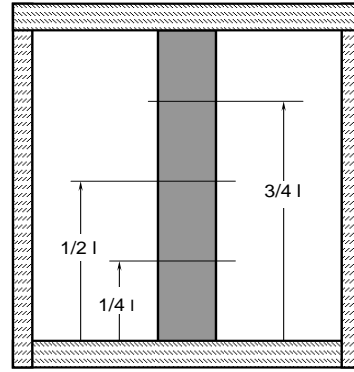


Рисунок 19 – Схема контролювання температур в сталевій обіймі трубобетонної колони-зразка

Згідно з методикою проведення вогневих випробувань трубобетонних колон було виміряно температуру сталеві обійми колон. На рис. 20 подані залежності температур у внутрішніх контрольних точках трубобетонних колон-зразків від часу випробувань.

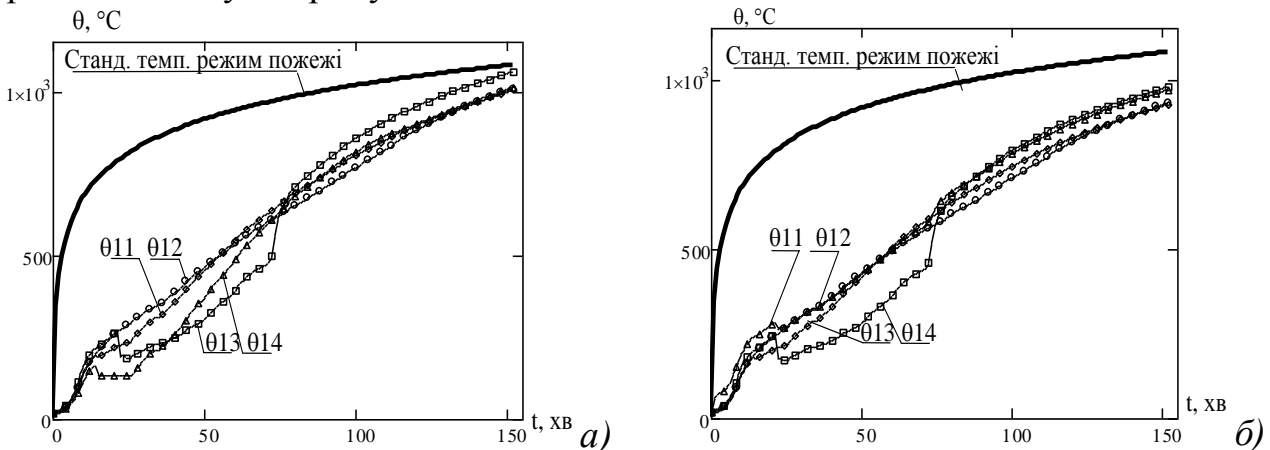


Рисунок 20 – Результати вимірювань температури (усередненої за вимірюваннями на різних рівнях колони по її довжині) у сталевій обіймі трубобетонних колон-зразків під час випробувань із заданою схемою розташування термопар: 1 – колони-зразок №1; 2 – колони-зразок №2

Для вивчення відмінностей теоретичних даних, отриманих у результаті розрахунку за моделями, використаними у попередньому розділі, та даними, отриманими у ході експерименту, було проведено порівняльний аналіз експериментальних та розрахункових даних (див. рис. 21).

Аналіз графіків на рис. 21 показав, що при використанні температурної кривої, отриманої за експериментальними даними для формулювання граничних умов III роду, маємо добру збіжність експериментальних та розрахункових даних щодо режиму прогрівання серединної точки перерізу трубобетонної колони.



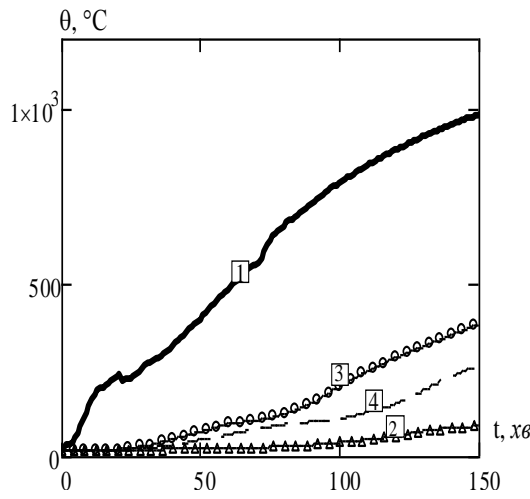


Рисунок 21 – Дані для порівняльного аналізу результатів розрахунку та експериментальних даних: 1 – температурна крива нагріву сталеві оболонки усереднена за даними випробувань; 2 – температурна крива нагріву середньої точки перерізу колони усереднена за даними випробувань; 3 – температурна крива нагріву середньої точки перерізу колони отримана у результаті розрахунку; 4 – температурна крива нагріву середньої точки перерізу колони отримана у результаті розрахунку за граничними умовами I роду за кривою 1.

У п'ятому розділі з метою вивчення впливу температури нагрівання зовнішньої оболонки трубобетонної колони круглого перерізу на її вогнестійкість були встановлені відповідні залежності критичної температури оболонки, при якій настає граничний стан втрати несучої здатності, від зміни величини навантаження та геометричних характеристик даних колон. При цьому був застосований математичний апарат та програмне забезпечення, описане у розділі 3. Отримані залежності наведені на рис. 22

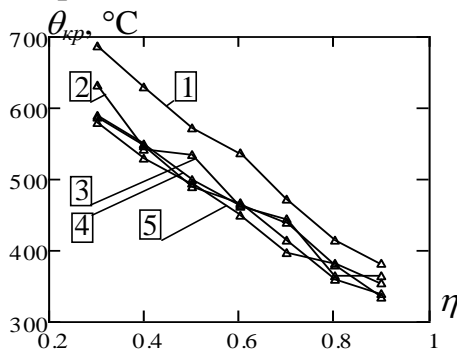


Рисунок 22 – Залежність критичної температури оболонки від зміни навантажень та діаметрів перерізу трубобетонних колон: 1 – 300 мм, 2 – 400 мм; 3 – 500 мм; 4 – 600 мм; 5 – 700 мм.

На графіках рис. 22 показано, що діаметр трубобетонних колон круглого перерізу має незначний вплив на критичну температуру цих колон, тому для визначення класу вогнестійкості можна використовувати критерій «критична температура». Для цього можна використовувати першу залежність критичної температури від рівня навантаження трубобетонної колони.

Для врахування залежності між критичною температурою та рівнем навантаження трубобетонних колон має бути побудована регресійна залежність. Оскільки дана залежність не має значного викривлення, її можна апроксимувати за допомогою квадратичного поліному.

Після проведення відповідних розрахунків була побудована відповідна регресія, основні параметри якої наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Параметри регресійної залежності критичної температури від коефіцієнту навантаження трубобетонної колони круглого перерізу

Коефіцієнти регресії	$b_0$	$b_1$	$b_2$
$\theta_{кр}(\eta) = b_0 + b_1\eta + b_2\eta^2$	859.989	-596.024	64.807

На рис. 23 наведено отриману регресійну залежність у вигляді графіку.

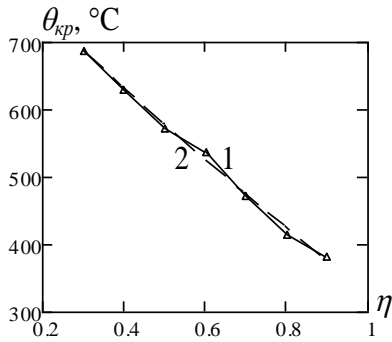


Рисунок 23 – Залежність критичної температури обійми, при якій настає граничний стан втрати несучої здатності, від зміни навантаження трубобетонних колон діаметром перерізу 300 мм: 1 – розрахункова залежність; 2 – регресійна залежність.

Таким чином, використовуючи отриману регресійну залежність, можна оцінити клас вогнестійкості трубобетонних колон круглого перерізу, якщо відома температура сталеві обійми.

При використанні отриманої залежності для розрахункової оцінки вогнестійкості трубобетонних колон потрібно дотримуватися певної послідовності.

1. Визначається коефіцієнт навантаження трубобетонної колони, як відношення діючої нормальної сили, помноженої на коефіцієнт зниження навантаження, до максимальної сили, що може витримати колона.

2. За регресійною залежністю визначається критична температура нагрівання сталеві обійми трубобетонної колони.

3. Для необхідного класу вогнестійкості обирається відповідний час впливу стандартного температурного режиму пожежі, після чого, з використанням формули (17) у випадку незахищеного перерізу, або формули (18) при наявності систем вогнезахисту, визначається температура нагрівання сталеві обійми.

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \cdot \frac{A_m}{V c_a \rho_a} \cdot \dot{h}_{net} \Delta t \quad (\Delta\theta_{a,t} \geq 0), \quad (10)$$

тут  $k_{sh}$  – поправочний коефіцієнт для врахування впливу тіньового ефекту;  $A_m/V$  – коефіцієнт перерізу для незахищених сталевих конструкцій (1/м);  $A_m$  – площа поверхні конструкції на одиницю довжини (м<sup>2</sup>/м);  $V$  – об'єм конструкції на одиницю довжини (м<sup>3</sup>/м);  $c_a$  – питома теплоємність сталі, (Дж/(кг · °C));  $\dot{h}_{net}$  – розрахункове значення результуючого питомого теплового потоку на одиницю площі (Вт/м<sup>2</sup>);  $\Delta t$  – проміжок часу (с);  $\rho_a$  – густина сталі, (кг/м<sup>3</sup>).

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p}{V d_p c_a \rho_a} \cdot \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \phi/3)} \cdot \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \cdot \Delta\theta_{g,t} \quad (\Delta\theta_{a,t} \geq 0 \text{ при } \Delta\theta_{g,t} > 0), \quad (11)$$

де  $\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} \cdot d_p A_p / V$ ;  $A_p/V$  – коефіцієнт перерізу для сталевих конструкцій, ізольованих вогнезахисним матеріалом;  $A_p$  – відповідна площа поверхні вогнезахисного матеріалу на одиницю довжини конструкції (м<sup>2</sup>/м);  $c_a$  – питома теплоємність сталі, залежна від температури (Дж/(кг · К));  $c_p$  – питома теплоємність

вогнезахисного матеріалу, не залежна від температури (Дж/(кг·°C));  $d_p$  – товщина вогнезахисного матеріалу (м);  $\theta_{g,t}$  – температура оточуючого газу у момент часу  $t$  (°C);  $\Delta\theta_{g,t}$  – підвищення температури оточуючого газу за проміжок часу  $\Delta t$  (°C);  $\lambda_p$  – коефіцієнт теплопровідності вогнезахисної системи (Вт/(м·°C));  $\rho_p$  – густина вогнезахисного матеріалу (кг/м<sup>3</sup>).

4. Отримана температура порівнюється з критичною температурою. Якщо температура нагрівання сталеві обійми трубобетонної колони не перевищує критичної температури, відповідний клас вогнестійкості досліджуваної колони вважається забезпеченим.

Розроблена методика для визначення класу вогнестійкості трубобетонних конструкцій ввійшла в комплекс заходів щодо продовження терміну експлуатації енергоблоків Запорізької АЕС.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі, яка є завершеним науковим дослідженням, розв'язано актуальну наукову задачу виявлення особливостей впливу геометричних розмірів та теплофізичних характеристик бетону і металу на цілісність трубобетонних конструкцій, як підгрунтя підвищення ефективності забезпечення їх пожежної безпеки. За результатами дисертаційної роботи сформульовано висновки.

1. Встановлено, що величина температурних напружень залежить від коефіцієнта температурного лінійного розширення, модуля пружності та коефіцієнта Пуассона, а також розмірів елементів конструкції. Встановлено, що найбільша величина температурних напружень досягається в бетоні. Встановлено, що в двохшарових колонах найменша величина радіальних температурних напружень досягається при рівних значеннях коефіцієнтів температурного лінійного розширення металу і бетону. При цьому значення напружень зменшуються на 63% при  $t_c=300^\circ\text{C}$  і на 77% при  $t_c=500^\circ\text{C}$ . При рівності коефіцієнтів Пуассона напруження зменшуються на 45% як при  $t_c=300^\circ\text{C}$ , так і  $t_c=500^\circ\text{C}$ .

2. Встановлено, що в трьохшаровій конструкції в центральному шарі виникають стискаючі напруження, які рівні по всьому перерізу і на поверхні спряження  $r=R_1$  дорівнюють напруженням в другому шарі. Напруження в другому шарі при наближенні до третього шару зменшуються по величині і з області стиску переходять до області розтягу. На поверхні  $r=R_2$  вони рівні напруженням в зовнішній трубі. При наближенні до зовнішньої поверхні вони зменшуються і на поверхні  $r=R_3$  дорівнюють нулю. При рівних значеннях  $\alpha_t^{(1)}=\alpha_t^{(2)}=\alpha_t^{(3)}$  радіальні температурні напруження зменшуються в 2,6 рази, а при рівних  $\nu_1=\nu_2=\nu_3$  – зменшуються в 1,7 рази.

3. При дослідженні трубобетонної колони виявлено залежність між межею вогнестійкості та прикладеним рівнем навантаження, яка є близькою до лінійної. Також досліджено сценарій руйнування трубобетонної колони в умовах пожежі із стандартним режимом, що полягає у утворенні локальної зони деформації сталеві обійми і, як наслідок, місцевої втрати стійкості посередині висоти колони.

4. Показано, що при застосуванні вогнезахисних систем на основі мінераловатних плит «Conlit SL150» та вогнезахисної штукатурки «Натреск» клас вогнестійкості труобетонної колони підвищується з R 15 до R 180, а при застосуванні вогнезахисної системи на основі вогнезахисної фарби, що спучується, «Pyro-Safe Flammoplast SP-A2» – підвищується з R 15 до R 90.

5. Розроблено методику вогневих випробувань труобетонних колон в умовах теплового впливу пожежі із стандартним температурним режимом. З використанням цієї методики проведено вогневі випробування двох зразків труобетонних колон протягом 150 хв, у результаті чого було отримано температурні показники у камері печі, у сталевих обоймах колон-зразків та у їхніх серединних точках. Отримані результати підтвердили позитивну збіжність експериментальних та розрахункових даних.

6. Показано, що межа вогнестійкості труобетонних колон круглого перерізу за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі залежить від температури нагріву сталевієї обойми колони та рівня її навантаження. Це дозволило виявити регресійну поліноміальну залежність критичної температури, при якій настає втрата несучої здатності труобетонних колон круглого перерізу при стандартному температурному режимі, від рівня її навантаження. Отримана залежність має вигляд  $\theta_{кр} = 859.989 - 596.024 \cdot \eta + 64.807 \cdot \eta^2$ .

7. Отримана залежність дозволила удосконалити спрощений метод розрахункової оцінки класу вогнестійкості труобетонних колон круглого перерізу за умов впливу стандартного температурного режиму. Удосконалений метод дозволив отримати високу достовірність отриманих результатів.

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*У наукових фахових виданнях:*

1. Семерак, М. М. Напружено–деформований стан труобетонних елементів за умов нагрівання [Текст] / М. М. Семерак, Д. В. Харишин // Пожежна безпека: зб. наук. праць. – Львів, 2016. – №29. – С. 136–141.

2. Семерак, М. М. Вплив фізико-механічних характеристик металу і бетону на термонапружений стан труобетонних колон за умов нагріву [Текст] / М. М. Семерак, Д. В. Харишин // Вісник ЛДУБЖД. – Львів, 2017. – № 15. – С. 165-172.

3. Семерак, М. М. Математична модель процесу нагрівання труобетонних колон за умов пожежі [Текст] / М. М. Семерак, О. В. Некора, Д. В. Харишин, [та ін.] // Пожежна безпека : зб. наук. праць. – Львів, 2017. – №30. – С. 148–158.

4. Семерак, М. М. Напружено–деформований стан труобетонної колони в умовах термосилового впливу пожежі [Текст] / М. М. Семерак, О. В. Некора, Д. В. Харишин // Пожежна безпека: зб. наук. праць. – 2017. – №31. С. 115–124.

5. Семерак, М. М. Математическое моделирование температурного поля в строительных конструкциях при пожаре с горением углеводородов [Текст] / М. М. Семерак, Д. В. Харишин // Вестник Кокшетауского технического института комитета по чрезвычайным ситуациям МВД Республики Казахстан. – 2016 – №4 (24). – С. 46–51.

6. Семерак, М. М. Огнестойкость трубобетонных колон защищенных огнезащитными материалами [Текст] / М. М. Семерак, О. В. Некора, Д. В. Харишин // Вестник Кокшетауского технического института комитета по чрезвычайным ситуациям МВД Республики Казахстан. – 2017 – №4 (28). – С. 42–50.

*Опубліковано в інших виданнях:*

7. Харишин, Д. В. Вогнестійкість бетонних конструкцій [Текст] / Д. В. Харишин, В. М. Байтала // Сучасний стан цивільного захисту України: перспективи та шляхи до Європейського простору: матеріали 18 Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників – К., 2016. – С. 306–308.

8. Харишин, Д. В. Напружено – деформований стан трубобетонних елементів за умов нагріву [Текст] / Д. В. Харишин, В. М. Байтала // Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації: матеріали міжнародної науково-практичної конференції. – Львів : ЛДУ БЖД, 2016. – С. 519–521.

9. Семерак, М. М. Температурні напруження в двошарових трубобетонних колонах [Текст] / М. М. Семерак, Д. В. Харишин, В. М. Байтала // Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції. – Черкаси, 2017. – С. 240–241.

10. Харишин, Д. В. Поведінка трубобетонних колон за умов пожежі [Текст] / Д. В. Харишин, М. М. Семерак // Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: матеріали 12 Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів. – Львів: ЛДУ БЖД, 2017. – С. 82–83.

11. Харишин, Д. В. Температурные напряжения в трубобетонных конструкциях в условиях пожара [Текст] / Д. В. Харишин, М. М. Семерак // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сборник материалов XI Международной научно-практической конференции молодых ученых курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов). – Минск, 2017 – С. 95–96.

12. Семерак, М. М. Трубобетонні колони з вогнезахисним покриттям та їх поведінка в умовах пожежі [Текст] / Д. В. Харишин, М. М. Семерак // Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції. – Черкаси, 2018. – С. 204–206.

*Особистий внесок здобувача у роботах, які опубліковані у співавторстві:*

[1] – здобувач розробив методіку досліджень напружено-деформованого стану в двошарових циліндричних конструкціях за умов нагріву. Розробив алгоритм та дослідив величину напружень в залежності від розмірів конструкцій та теплофізичних характеристик бетону і металу. Керівнику належить постановка задачі.

[2] – здобувачу належить постановка задачі, алгоритм розрахунку та аналіз результатів.

[3] – здобувачу належить аналіз публікацій за темою дослідження, методика розв’язку диференціальних рівнянь, розробка алгоритму досліджень, аналіз результатів та формування висновків. Керівнику належить постановка задачі.

[4] – здобувач спільно з керівником провели постановку задачі. Здобувач сформулював граничні умови нагріву, здійснив аналіз вогнезахисних матеріалів, адаптував чисельні методи використання розрахунків температурного поля конструкцій з вогнезахисними покриттями, а також проаналізував отримані результати та сформулював висновки.

[5] – здобувачем розроблено методику, яка враховує інтенсивність теплової дії на колону. Розглянуто температурну криву та модифіковану температурну криву. Розв'язано диференціальне рівняння теплопровідності при заданих інтенсивностях теплової дії. Проведено розрахунки та здійснено аналіз отриманих результатів.

[6] – здобувач розробив методику дослідження вогнестійкості трубобетонних конструкцій, захищених вогнезахисними матеріалами.

[7] – здобувачем створено математичну модель та визначено розподіл температурних напружень за часу в перерізі бетонної конструкції.

[8] – здобувачем досліджено вплив фізиком-механічних характеристик бетону та металу на виникнення температурних напружень в трубобетонних колонах за умов нагріву.

[9] – здобувачем досліджено розподіл радіальних та кільцевих температурних напружень в поперечному перерізі трубобетонних колон із сталевими обоймами, заповненими бетоном, при наявності отвору та при його відсутності.

[10] – здобувачем досліджено зміну величини радіальних температурних напружень в трьохшаровій трубобетонній колоні.

[11] – здобувачем розроблено модель та вивчено залежність величини радіальних та кільцевих температурних напружень на поверхні спряження бетону і металу від товщини стінки.

[12] – здобувачем спільно з керівником здійснено математичне моделювання розподілу нестационарних температурних полів за товщиною трубобетонних колон із вогнезахисними системами різних видів та виконано порівняльний аналіз отриманих результатів.

## АНОТАЦІЯ

**Харишин Д. В. Вплив конструктивних особливостей та теплофізичних характеристик бетону і металу на вогнестійкість трубобетонних конструкцій. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 21.06.02 «Пожежна безпека». – Львівський державний університет безпеки життєдіяльності ДСНС України, Львів - 2018.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі – розробці ефективного розрахункового методу визначення межі вогнестійкості трубобетонних конструкцій (ТБК) шляхом математичного моделювання теплових процесів та напружено-деформованого стану конструкцій за умов пожежі.

Проведено математичне моделювання термонапруженого стану трубобетонних конструкцій за умов стаціонарної теплопровідності. Під час

дослідження вибрано найбільш поширені конструктивні типи ТБК та розроблено математичні моделі дослідження напружено-деформованого стану ТБК за умов їх нагрівання з врахуванням їх геометричних розмірів та їх теплофізичних характеристик.

Визначена межа вогнестійкості за несучою здатністю трубобетонної колони без вогнезахисту у інтервалі часу впливу пожежі із стандартним температурним режимом від 0 до 30 хв. Наведено методику та результати стандартних вогневих випробувань, метою яких було вивчення температурних розподілів у перерізі трубобетонних колон з використанням відповідного стандарту, чинного в Україні. Випробування проводилися у сертифікованій вогневій печі.

Методика, розроблена для визначення класу вогнестійкості трубобетонних конструкцій, увійшла в комплекс заходів, щодо продовження терміну експлуатації енергоблоків Запорізької АЕС.

**Ключові слова:** трубобетонні конструкції, пожежа, пожежна безпека, вогнестійкість, напружено-деформований стан, нестационарне температурне поле, теплофізичні характеристики.

#### АННОТАЦИЯ

**Харышин Д. В. Влияние конструктивных особенностей и теплофизических характеристик бетона и металла на огнестойкость трубобетонных конструкций. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 21.06.02 «Пожарная безопасность». – Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности ГСЧС Украины, Львов – 2018.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-технической задачи - разработке эффективного расчетного метода определения предела огнестойкости трубобетонных конструкций (ТБК) путем математического моделирования тепловых процессов и напряженно-деформированного состояния конструкций в условиях пожара.

Выполнено математическое моделирование термонапряженного состояния трубобетонных конструкций в условиях стационарной теплопроводности. Во время исследования были использованы наиболее распространенные типы ТБК и разработаны математические модели исследования напряженно-деформированного состояния ТБК в условиях их нагрева с учетом их геометрических размеров и их теплофизических характеристик.

Был рассчитан предел огнестойкости трубобетонных колонн без огнезащиты по несущей способности в интервале времени воздействия пожара со стандартным температурным режимом от 0 до 30 мин. Была определена методика стандартных огневых испытаний, результаты которых позволили изучить распределение температур в сечении трубобетонных колонн с использованием соответствующего стандарта, действующего в Украине. Испытания проводились в сертифицированной огневой печи.

Методика для определения класса огнестойкости трубобетонных конструкций вошла в комплекс мероприятий по продлению срока эксплуатации энергоблоков Запорожской АЭС.

**Ключевые слова:** трубобетонные конструкции, пожар, пожарная безопасность, огнестойкость, напряженно-деформированное состояние, нестационарное температурное поле, теплофизические характеристики.

### ABSTRACT

**Haryshyn D. V.** Influence of structural features and thermophysical characteristics of concrete and metal on fire-resistance of steel tube confined concrete constructions. – The manuscript.

Thesis for a candidate degree in Engineering by specialty 21.06.02 – Fire Safety. – Lviv State University of Life Safety, Lviv, 2018.

The dissertation is devoted to the solution of the actual scientific and technical problem – the development of an effective calculation method for determining the fire resistance time of steel tube confined concrete constructions (STCC) using mathematical modeling of thermal processes and stress-strain state of constructions under fire conditions.

The analysis of scientific researches that deal with steel tube confined concrete was done. According to the analysis there were not enough data on STCC constructions' testing on fire resistance. The literature also lacks scientific publications on predicting the fire resistance time of STCC constructions. The most common types of STCC constructions, their sizes and characteristics of materials were analyzed.

The mathematical modeling of the thermo-stressed state of steel tube confined concrete constructions under the conditions of steady heat conduction was carried out. During the research, the most common types of STCC constructions were selected and mathematical models of their stress-strain state in conditions of heating were developed. Geometric sizes and thermophysical characteristics of the constructions were taken into account.

The results of the mathematical modelling showed that temperature stresses in STCC constructions are influenced by the difference between characteristics of concrete and steel (such as the thermal coefficients of linear expansion, the elastic modulus and the Poisson coefficients).

The distribution of the non-steady temperature field under the conditions of the standard temperature mode of the fire was investigated. To calculate the temperature distribution in the STCC pillar a generalized engineering approach, recommended in the works of many authors and calculation standards, was applied. The fire resistance time at the carrying capacity (under the conditions of the standard temperature mode of the fire) of the STCC pillar without fire protection in the interval of time from 0 to 30 minutes was defined. The maximum fire resistance time for carrying capacity for a pillar with load levels from 0.3 to 0.9 from the maximum compressive force was from 10 to 24 minutes. The temperature distributions in the cross-section of the STCC pillar were investigated. The results showed that the fire resistance time depends on the temperature of the steel casing and, as a rule, is determined with its heating to a temperature of 550 °C.



The methodology and results of standard fire tests were presented, the purpose of which was to study the temperature distributions in the cross-section of STCC pillar, using the corresponding current standard of Ukraine. The tests were carried out in a certified fire furnace.

A comparative analysis of data, obtained using mathematical models and data obtained during the experiment, was carried out. It showed a significant difference, which is explained by the evaporation and filtration of moisture through the porous structure of the cement stone, resulting in substantial cooling of the surface layers of concrete and steel at the boundary zone. According to the experimental data the boundary value problem of thermal conductivity with Derichlet's boundary conditions was developed. Calculations, in which experimental averaged temperature heating curve of steel casing was taken into account, were performed. The positive convergence of experimental and calculated data is obtained. The developed methodology for determining the fire resistance class of STCC constructions has been included in the complex of measures for extending the life of the power units of the Zaporizhzhya NPP.

**Key words:** steel tube confined concrete constructions, fire, fire safety, fire resistance, stress-strained state, non-stationary temperature field, thermophysical characteristics.



---

Підписано до друку 26.11.2018 р.  
Друк на різнографі  
Наклад 100 прим.

Формат 60x80/16  
Ум. друк. арк. 0,9  
Зам. № 08/2018

---