

УДК 614.839

## МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО ПРОГРІВУ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОЛОН

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2.87-98>

Ковальов А. І.<sup>1\*</sup>, ORCID iD 0000-0002-6525-7558  
Пурденко Р. Р.<sup>2</sup>, ORCID iD 0000-0001-6467-4133  
Отрош Ю. А.<sup>1</sup>, ORCID iD 0000-0003-0698-2888  
Томенко В. І.<sup>3</sup>, ORCID iD 0000-0001-7139-9141  
Рашкевич Н. В.<sup>1</sup>, ORCID iD 0000-0001-5124-6068  
Юрченко С. П.<sup>4</sup>, ORCID iD 0000-0002-2775-238X  
\*E-mail: kovalev27051980@gmail.com

<sup>1</sup> Національний університет цивільного захисту України, Україна

<sup>2</sup> Приватне підприємство «ПроектБудСтар», Україна

<sup>3</sup> Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Україна

<sup>4</sup> Черкаський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України, Україна

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 19.09.2022  
Пройшла рецензування: 11.11.2022

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

вогнестійкість, моделювання нестационарного прогріву, залізобетонна колона, вогнезахист, вогнезахисне покриття, ЛІРА-САГР

### АНОТАЦІЯ

Проведено аналіз результатів досліджень вогнестійкості залізобетонних конструкцій і встановлено, що сучасні підходи до оцінювання вогнестійкості не завжди дають змогу отримати оптимальні рішення для теплотехнічного розрахунку вогнезахисної залізобетонної колони. Створення основ для ефективного оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів є актуальною проблемою, розв'язання якої призведе до підвищення точності теплотехнічного розрахунку вогнезахисних залізобетонних колон з необхідною для інженерних розрахунків досконалістю. З огляду на це розроблено комп'ютерну модель для моделювання нестационарного прогріву вогнезахисної залізобетонної колони, що дає змогу оцінювати вогнестійкість як незахищених, так і вогнезахисних залізобетонних колон, враховувати властивості матеріалів колон та вогнезахисного покриття. Алгоритм оцінювання містить виконання експериментальних та розрахункових процедур під час визначення вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних колон. За допомогою розробленої моделі проведено моделювання нестационарного прогріву вогнезахисної залізобетонної колони за стандартного температурного режиму пожежі. Особливістю моделювання нестационарного прогріву вогнезахисної залізобетонної колони полягає у задаванні теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття під час розв'язання задачі нестационарної теплопровідності. Під час визначення ефективності розробленої моделі було проведено порівняння результатів чисельного моделювання прогріву залізобетонної колони з результатами експериментального дослідження вогнестійкості залізобетонної колони. Також було запропоновано моделювання вогнезахисту залізобетонної колони для підвищення меж вогнестійкості до необхідних значень межі вогнестійкості. Підтвердженням адекватності розробленої моделі є задовільна збіжність експериментальних та розрахункових температур. Особливістю розробленої комп'ютерної моделі є можливість моделювання нестационарного прогріву вогнезахисних залізобетонних колон з урахуванням їх початкових та граничних умов, геометрії, характеристик матеріалів, класу бетону, класу арматури, теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів, умов випробувань та умов обігріву.

**Постановка проблеми.**

Забезпечення безпеки людей і матеріальних цінностей необхідно виконувати з урахуванням усіх стадій життєвого циклу об'єктів, а саме – це науковий супровід, моніторинг, проектування, будівництво, експлуатація, а також унеможливлення пожежі [1].

Запобігти виникненню пожежі дають змогу технічні засоби та організаційні заходи, за яких ймовірність її виникнення та розвитку не перевищує нормованого допустимого значення.

Одним із факторів, на якому ґрунтуються вимоги пожежної безпеки під час проектування, будівництва, реконструкції, зміни функціонального призначення будівель та споруд різного призначення є забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій. Умовою зниження незворотних наслідків пожеж на об'єктах різного призначення є збереження несучої здатності будівельних конструкцій, технологічних споруд і комунікацій.

З огляду на зазначене вище в умовах глобалізації й збільшення загроз для людини найбільше значення має саме збереження стійкості будівель та споруд під час пожеж, а також збереження їх функціонального призначення після таких впливів.

Створення методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів є актуальним. Розв'язання цієї проблеми призведе до підвищення точності розрахунку за нестационарного прогріву вогнезахисних залізобетонних колон з необхідною для інженерних розрахунків точністю. Це можливо реалізувати завдяки чисельному моделюванню в сучасних програмних комплексах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вимоги стійкості будівельних конструкцій внаслідок дії високих температур забезпечуються комплексом заходів, що передбачаються як технологією виробництва, так і застосуванням ефективних вогнезахисних покриттів [2].

У [3] розглянуто питання, пов'язані з підвищенням вогнестійкості залізобетонних конструкцій через використання вогнезахисних покриттів. Наведено дані експериментальних досліджень швидкості нагрівання цегли, покритої алюмінієвим шаром, що є вогнезахисним покриттям. Дослідження проводилися через порівняння зміни у часі температури матеріалу з нанесеним алюмінієвим шаром із температурою без нанесеного алюмінієвого шару. Отримані результати досліджень свідчать про зниження швидкості нагрівання облицювальної цегли під дією теплового нагрівання. Однак поза увагою дослідників залишилися питання обґрунтування параметрів покриття на основі алюмінію для захисту залізобетонних конструкцій.

У [4] основна увага приділена дослідженню вогнестійкості залізобетонних колон під час випробувань за стандартного температурного режиму пожежі. Проводилась оцінка залишкової міцності колон на стиск після впливу стандартної пожежі протягом 60 та 120 хв і за різного навантаження (20 % і 40 % від розрахункового осьового навантаження колони). Внаслідок проведення випробувань встановлено, що колони не відновлюють свою початкову міцність після впливу стандартного температурного режиму пожежі. Залишкова міцність колон на стиск зменшилась майже до 50 % і 30 % від межі міцності, які зазнали впливу протягом 60 та 120 хв пожежі. Незважаючи на практичну значущість таких результатів, достатньою мірою не розглянуто питання щодо розрахунків вогнезахисних залізобетонних колон.

У [5] проаналізовано руйнування залізобетонних колон після впливу високих температур за різних температурних режимів пожежі. Зроблено висновок, що у разі оцінювання надійності залізобетонної колони необхідно враховувати реальний температурний режим пожежі. Однак залишилися невирішеними питання прогнозування меж вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних колон за реальних режимів

пожежі з використанням сучасних програмних комплексів. Вочевидь це пов'язано з труднощами побудови кінцево-елементної моделі вогнезахищеної конструкції в таких комплексах і правильного задавання параметрів вогнезахисних матеріалів.

Автори [6] свої зусилля зосередили на вивченні несучої здатності залізобетонних колон, що піддаються одночасному впливу високої температури та осьового навантаження. Для проведення чисельних досліджень було розроблено нелінійні моделі у програмі ABAQUS з використанням процедури аналізу «температура-переміщення». Проте поза увагою дослідників залишилися питання оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних колон, а також вплив параметрів вогнезахисних покриттів на вогнестійкість конструкцій.

У [7] автори розробили чисельну модель для вивчення взаємозв'язку між вогнестійкістю залізобетонних колон та найбільш важливими параметрами, зокрема такими, як: рівень навантаження, коефіцієнт гнучкості, ексцентриситет навантаження, товщина захисного шару бетону, форма та розмір поперечного перерізу. Модель використовує метод Ньютона-Рафсона для визначення розподілу деформації в поперечному перерізі нагрітої колони. Однак, незважаючи на прогрес у вивченні взаємозв'язку між вогнестійкістю залізобетонних колон та найбільш важливими параметрами, невирішеними залишилися питання теплотехнічного розрахунку вогнезахищених залізобетонних колон.

У [8] описані прості аналітичні методи для прогнозування поведінки залізобетонних колон, які піддаються впливу вогню. Зважаючи на аналіз, передбачено навантаження (без початкового ексцентриситету) або еквівалентне осьове навантаження для врахування ефектів першого та другого порядку. Однак у запропонованій в роботі моделі не враховується використання вогнезахищених залізобетонних

конструкцій з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів. Це накладає певні обмеження на аналіз вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій за допомогою розробленої моделі.

У [9] наведена спрощена модель для оцінки вогнестійкості залізобетонних колон, що піддаються впливу навантаження та вогню. Для визначення температурного поля перерізу під час дії полум'я пожежі використовується метод кінцевих різниць. Проте не визначено, як цю модель можна застосовувати для оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій. З погляду практики, це може зумовити труднощі, що пов'язані з урахуванням теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів для підвищення меж вогнестійкості залізобетонних конструкцій.

У [10] наводяться результати дослідження з моделювання впливу пожежі на вогнестійкість колон з високоміцного бетону за допомогою універсальної моделі для аналізу поведінки колон за високотемпературного впливу. Запропонована модель може бути використана для визначення кривих навантаження-прогин та прогнозування пікових навантажень колони за температури навколишнього середовища. Незважаючи на практичну значущість отриманих результатів, достатньою мірою не розглянуто питання щодо розрахунків вогнезахищених залізобетонних конструкцій. Вочевидь це пов'язано з труднощами побудови моделі вогнезахищеної конструкції в зазначеному програмному комплексі та точному задаванні параметрів вогнезахисних матеріалів.

У [11] автори розробили модель визначення вогнестійкості залізобетонних колон через урахування впливу різних ключових параметрів: передчасне розтріскування бетону під час пожежі, ефект місцевого випучування поздовжньої арматури, спричиненого вибуховим сколюванням. Також модель включає ефект

локального вигину поздовжньої арматури, зумовлений вибуховим розколюванням. Проте в роботі залишилися нерозкритими питання щодо побудови моделі вогнезахищених залізобетонних конструкцій, а саме – залізобетонних колон.

Систематизація результатів наведених досліджень дає змогу констатувати факт, що сучасні підходи до оцінювання вогнестійкості залізобетонних конструкцій спираються на експериментальні та частково розрахункові процедури. Вочевидь це дає змогу знаходити ухвалені рішення тільки в тому випадку, якщо кожного разу проводити експериментальні випробування одного типу та розмірів залізобетонної колони. Для розрахункового методу це діє, якщо відомі з заданою точністю параметри теплової моделі та математичний опис процесу в системі «залізобетонна колона – вогнезахисне покриття». З огляду на це можна зробити висновок, що порушення вказаних умов не дає можливості отримання оптимальних рішень для теплотехнічного розрахунку вогнезахищеної залізобетонної колони.

Таким чином, проблема оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій може бути розв'язана через розроблення кінцево-елементної моделі для оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних колон з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів. Розроблена модель має базуватися на отриманні результатів з необхідною для інженерних розрахунків точністю як з використанням даних експериментальних досліджень, так і за результатами чисельного моделювання в сучасних програмних комплексах.

**Формулювання цілей досліджень.** За мету ставилось

розроблення комп'ютерної моделі для оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних колон, яка створена в програмному комплексі ЛІРА-САПР.

Для досягнення поставленої мети потребували вирішення такі завдання:

– розробити комп'ютерну модель для оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних колон у програмному комплексі ЛІРА-САПР;

– провести моделювання нестационарного прогріву залізобетонної колони в програмному комплексі ЛІРА-САПР;

– провести моделювання вогнезахисту залізобетонної колони у програмному комплексі ЛІРА-САПР для підвищення вогнестійкості до нормованих значень та оцінку точності розробленої моделі.

**Методи дослідження.** Межа вогнестійкості колон визначалася за ДСТУ Б В.1.1-4-98\* та ДСТУ Б В.1.1-14:2007. Метод полягав у нагріві за стандартного температурного режиму згідно з ДСТУ Б В.1.1-4-98\* зразків колон, які встановлювалися у вогневу піч, та визначенні часу, коли досягається граничний стан за ознакою втрати несучої здатності, що визначається з огляду на розподіл температур (арматури та бетону) по перерізу колони під час випробувань. Несуча здатність може бути оцінена щодо перевищення середньої температури несучих арматур, які більш наближені до поверхні, від їх початкового значення температури на 480 °С.

Об'єктом випробування були два зразки – фрагменти залізобетонних колон квадратного перерізу з фактичним розміром 600×600 мм та висотою 2000 мм (рис. 1).

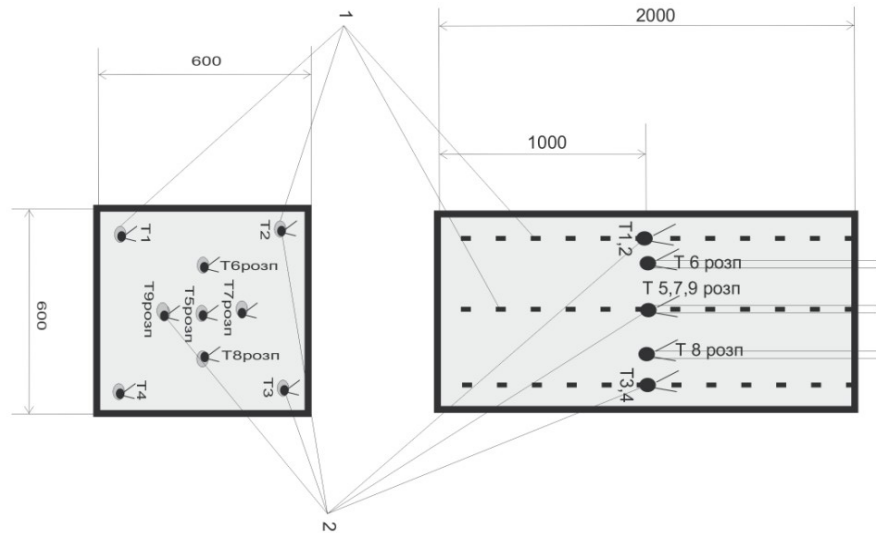


Рисунок 1 – Схема розташування термопар на зразку: 1 – несучі арматурні стрижні; 2 – термопари

Джерело: розробка авторів

Кожний зразок мав несучий каркас, що складався з 16-ти вертикальних несучих арматур  $\text{Ø}20$  мм А400С. Арматура зв'язку  $\text{Ø}10$  мм А400С у кількості 26 одиниць закладалась по зовнішньому контуру несучих арматур та арматура зв'язку  $\text{Ø}10$  мм А400С у кількості 6 одиниць закладалась між центральними боковими арматурами. Бетон – класу С25.

За результатами обстеження зразків після випробування фактичне середнє значення товщини захисних шарів до вісі несучої арматури складало 51 мм. Випробування проводилося за стандартного температурного режиму пожежі. Результати вимірювань температур несучої арматури та температури по перерізу зразків наведено на рис. 2.

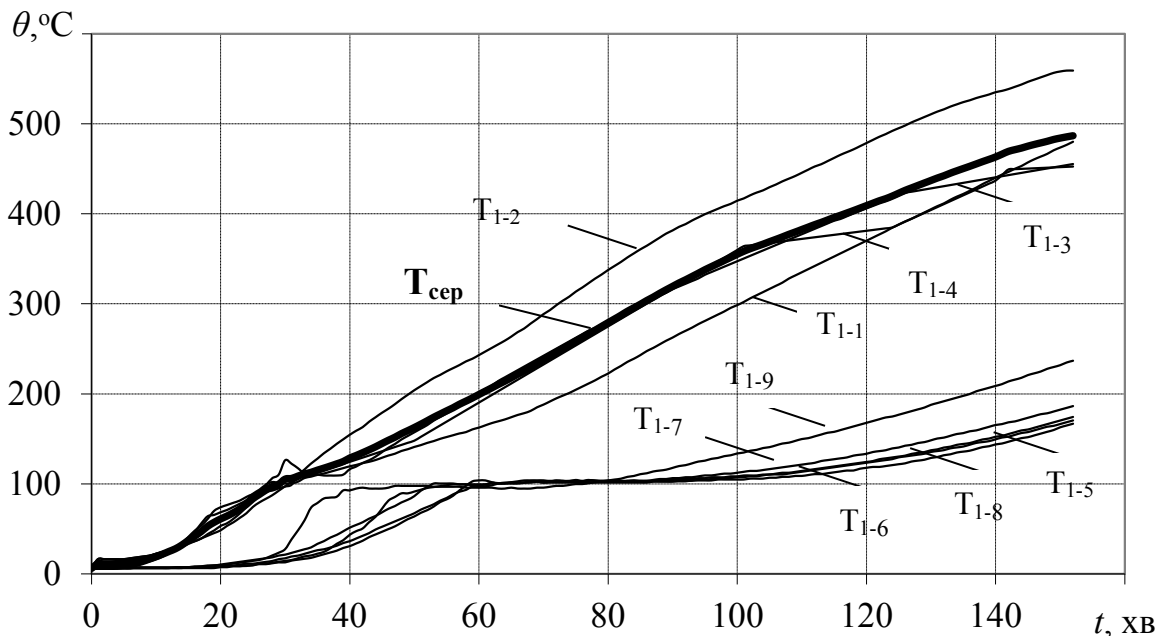


Рисунок 2 – Температура несучих арматурних стрижнів ( $T_{1-1}$ - $T_{1-4}$ ), середня ( $T_{сер}$ ) та по перерізу ( $T_{1-5}$ - $T_{1-9}$ ) зразка № 1 колони

Джерело: розробка авторів

Початкова температура повітря під час випробувань складала  $6^{\circ}\text{C}$ , відносна вологість повітря – 60 %.

Для більшості матеріалів надаються дані щодо характеристик показників лише за кімнатної температури, чи взагалі таких даних немає. Цей факт є однією з причин обмеженого використання розрахункових методів, заснованих на математичному моделюванні процесів теплообміну для розв'язання задач проектування вогнестійких конструкцій, а саме – вогнезахисних залізобетонних конструкцій.

Використовуючи результати випробувань на вогнестійкість, виконано чисельне моделювання прогріву залізобетонної колони в програмному комплексі ЛПА-САПР (ліцензія № 1/8583 від 16.02.2022).

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Алгоритм розроблення комп'ютерної моделі залізобетонної колони в програмному комплексі ЛПА-САПР являє собою систему рівнянь, розв'язок яких дає змогу отримати значення температури у кожному вузлі координатної сітки, що накладалася на переріз. Координатна сітка накладалася так, щоб її вузли розташовувалися не тільки в товщині перерізу, а й по периметру, а також у центрі стрижнів для конструкцій з гнучкою арматурою, по довжині полиць і стінки всередині їхньої товщини для конструкцій з жорсткою арматурою. Для більш точних розрахунків розробники програми крок сітки рекомендують задавати в межах 0,01–0,03 м, але він обов'язково має бути більшим за максимальний діаметр робочої арматури. Одним із найважливіших етапів кінцево-елементного аналізу є побудова сітки кінцевих елементів. Точність розрахунку за допомогою методу кінцевих елементів залежить від правильного вибору типів та розмірів кінцевих елементів. Ми вибрали прямокутну сітку з чотирма вузлами, що дає більш точні результати, ніж сітка з трикутними елементами. Це пояснюється таким чином. Дрібна сітка потрібна там, де очікується великий градієнт деформацій чи

напруг (отвір, виточення, тріщина тощо). У той же час сітка великих розмірів може застосовуватися в зонах із деформаціями або напруженнями, що мало змінюються, а також в областях, що не становлять особливого інтересу для розрахунків. Таким чином, сітка кінцевих елементів має в основі наближені до квадратів елементи, що є для розрахунку матриці ідеальним варіантом, довжина елементів не перевищує  $1/10$  розміру поперечного перерізу, що відповідає рекомендації щодо формування сітки кінцевих елементів. Зменшення розмірів призведе до збільшення значної кількості кінцевих елементів, а це – до збільшення часу розрахунку і використання більш потужної обчислювальної техніки, проте на аналіз результатів впливу не матиме.

Проведено моделювання поперечного перерізу залізобетонної колони у 15-й ознаці схеми в програмному середовищі ЛПА-САПР (рис. 3). У побудованій комп'ютерній моделі в програмному комплексі ЛПА-САПР враховуються радіаційно-конвективний теплообмін у газовому середовищі від джерела теплового впливу до поверхні конструкції та теплообмін теплопровідністю у залізобетонній колоні, а також проводяться розрахунки із застосуванням граничних умов третього роду і граничних умов складного радіаційно-конвективного теплообміну.

Під час моделювання нестационарного прогріву залізобетонної колони в програмному комплексі ЛПА-САПР використана модель колони (рис. 3), яка обігривається з чотирьох боків за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі. Теплофізичні і механічні характеристики залізобетону та сталі [12] задані залежними від температури. Коефіцієнт теплопровідності та питома об'ємна теплоємність бетону колони були знайдені розв'язанням обернених задач теплопровідності за результатами випробувань на вогнестійкість [13].

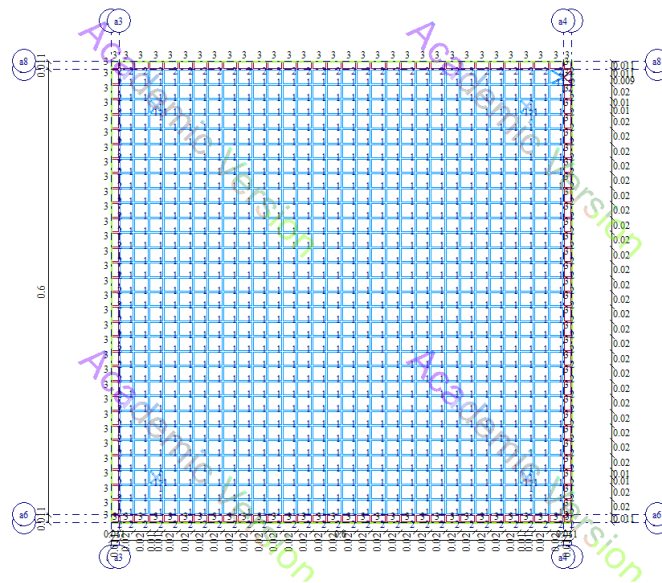


Рисунок 3 – Кінцево-елементна модель залізобетонної колони з типами елементів жорсткості Джерело: розробка авторів

Коефіцієнти тепловіддачі та теплового випромінювання задані константами. Початкова температура конструкції 6 °С.

Інші параметри для моделювання теплового стану залізобетонної колони задавалися згідно з [14]:

$\Phi$  – кутовий коефіцієнт,  $\Phi = 1,0$ ;

$\varepsilon_m$  – коефіцієнт теплового випромінювання обігрівної поверхні покриття,  $\varepsilon_m = 0,7$ ;

$\varepsilon_f$  – коефіцієнт теплового випромінювання полум'я,  $\varepsilon_f = 1,0$ ;

$\sigma$  – стала Стефана Больцмана,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> · °С<sup>4</sup>);

$\rho$  – густина бетону,  $\rho = 2300$  кг/м<sup>3</sup>.

За допомогою чисельного моделювання були отримані розподіли температур у залізобетонній колоні на 30, 60, 90 та 120 хв вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі під час обігріву колони з чотирьох боків (рис. 4).

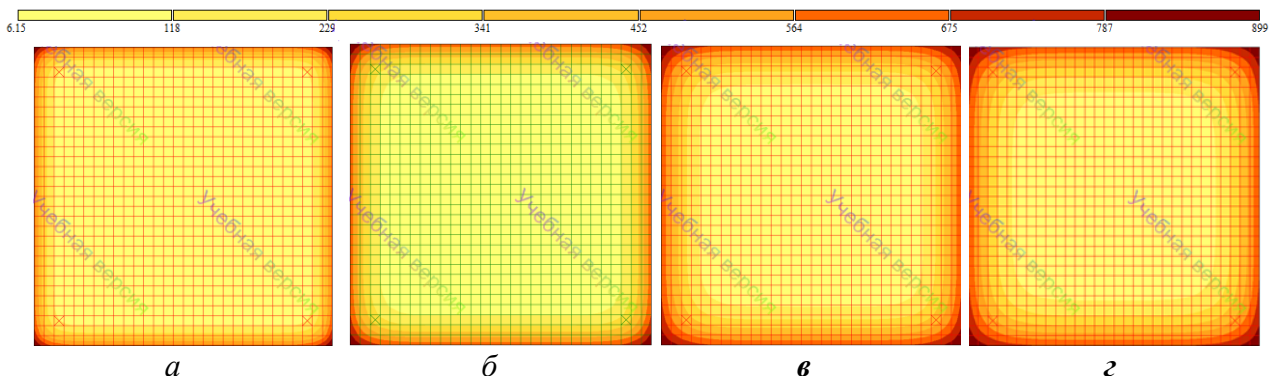


Рисунок 4 – Розподіл температур у залізобетонній колоні на 30 (а), 60 (б), 90 (в) та 120 (г) хвилинах випробування

Джерело: розробка авторів

На рис. 5 показано, що криві зміни середньої температури несучих арматурних стрижнів від 20 до 50 хв

випробування мають незначні розбіжності, проте після 50 хв встановлено задовільну збіжність експериментальних та

розрахункових температур. Водночас найбільше відхилення температури спостерігалось на 60 хв розрахунку і становило 13 °С, що відповідає похибці 7%. (Ці твердження суперечать одне одному) Це підтверджує правильність

побудови комп'ютерної моделі в програмному комплексі ЛІРА-САПР для оцінювання вогнестійкості залізобетонних колон та її використання під час моделювання прогріву залізобетонних конструкцій інших видів.

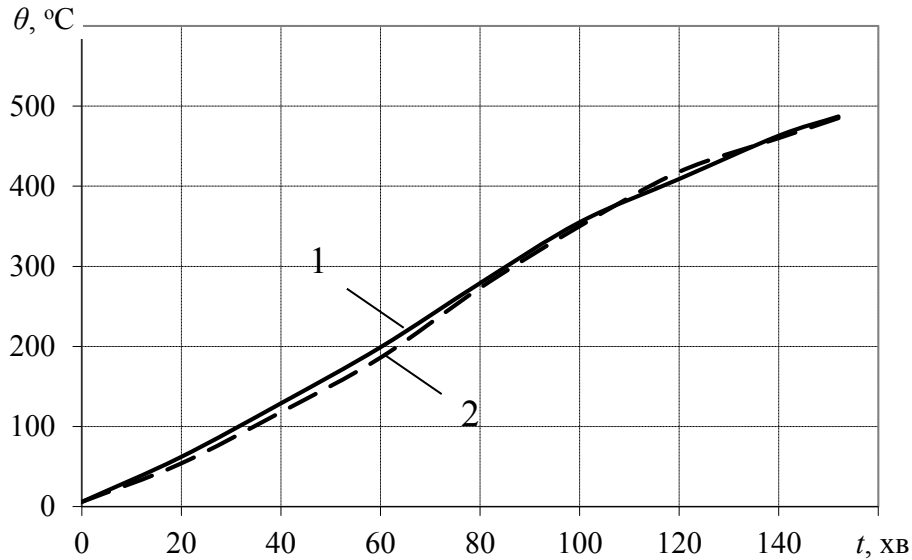


Рисунок 5 – Середня температура на несучих арматурних стрижнях на 152 хв прогріву незахищеної залізобетонної колони: 1 – експериментальна крива; 2 – розрахункова  
Джерело: розробка авторів

Як видно з рис. 5, крива 2 зміни температури на несучих арматурних стрижнях від часу вогневого впливу задовільно корелює з експериментальною кривою 1 і за 120 хв прогріву за стандартним температурним режимом пожежі арматурні стрижні колони прогрілися до 400°С. Ця модель надалі використовувалась для моделювання вогнестійкості вогнезахисених

залізобетонних колон у разі забезпечення меж вогнестійкості більше 120 хвилин.

Використовуючи створену в програмному комплексі ЛІРА-САПР модель (рис. 3) та теплофізичні характеристики досліджуваного пасивного вогнезахисного покриття для підвищення вогнестійкості залізобетонних конструкцій було побудовано модель вогнезахисеної залізобетонної колони (рис. 6).

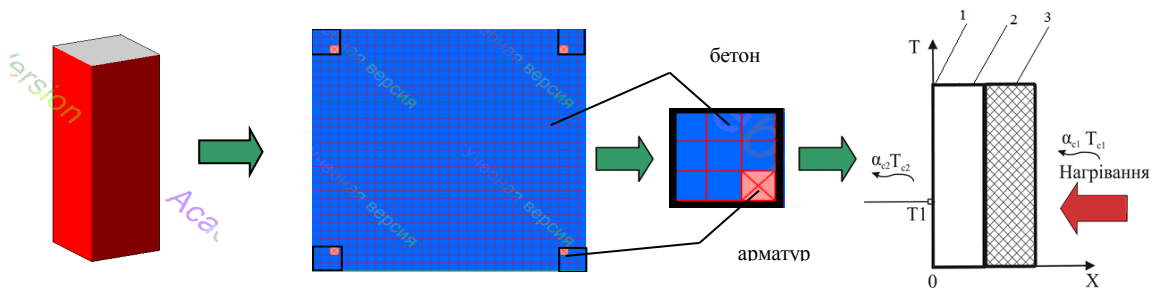


Рисунок 6 – Модель вогнезахисеної залізобетонної колони: 1 – арматурний стрижень; 2 – бетон; 3 – вогнезахисне покриття; T<sub>1</sub> – термопара, встановлена на арматурі

Теплофізичні характеристики вогнезахисного покриття, які залежать від температури [13–14], наведено на рис. 7.



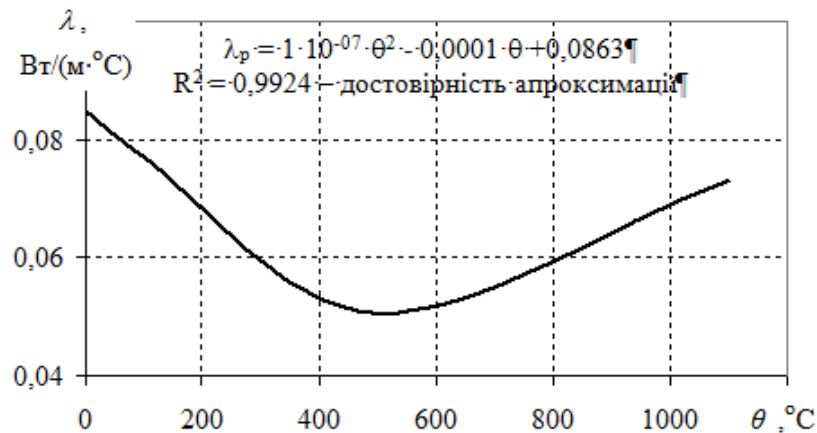


Рисунок 7 – Коефіцієнт теплопровідності вогнезахисного покриття

Джерело: розробка авторів

Питома об’ємна теплоємність покриття була знайдена розв’язанням обернених задач теплопровідності і склала  $C_v=10^6$  Дж/м<sup>3</sup>·°С. Водночас густина покриття складає  $\rho_p=500$  кг/м<sup>3</sup> і, як наслідок, питома теплоємність покриття для розрахунків бралася рівною 2000 Дж/(кг·°С). Закономірність поведінки коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття описується регресійною залежністю виду:  $\lambda_p=1 \cdot 10^{-07} \cdot \theta^2 - 0,0001 \cdot \theta + 0,0863$  з достовірністю апроксимації 0,9924 (рис. 7).

За допомогою розробленої моделі (рис. 6), використовуючи теплофізичні характеристики покриття (рис. 7), проведено моделювання вогнезахисту

залізобетонної колони. Внаслідок проведених досліджень встановлено, що для підвищення межі вогнестійкості залізобетонної колони розмірами 600×600 мм до 180 хв необхідно запроєктувати вогнезахист як пасивне вогнезахисне покриття [14]. Водночас товщина вогнезахисного покриття згідно з розрахунками склала 11 мм на основі розв’язання прямих задач теплопровідності у програмному комплексі FRIEND [14].

На рис. 8 наведені результати моделювання нестационарного прогріву вогнезахисної залізобетонної колони на 120 хв випробування з товщиною вогнезахисного покриття 11 м.

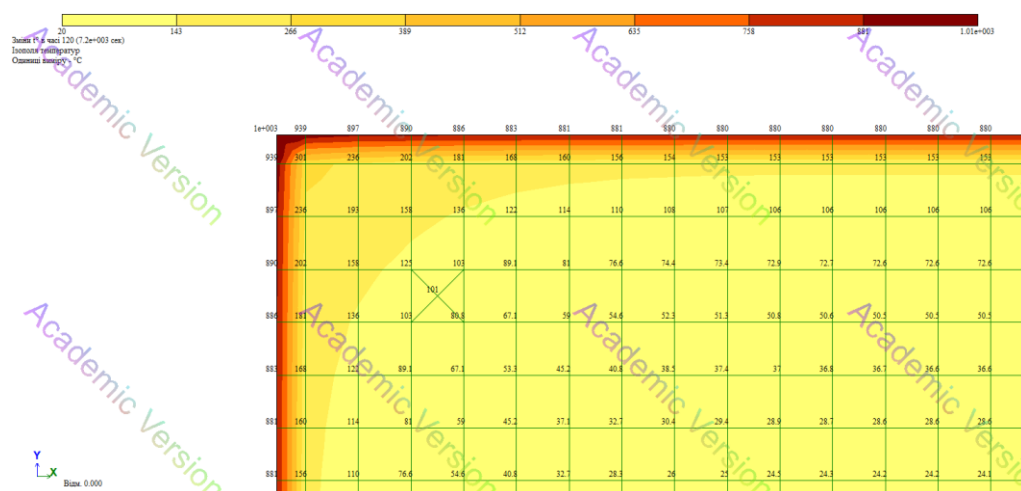


Рисунок 8 – Розподіл температур у вогнезахисній залізобетонній колоні на 120 хв випробування

Джерело: розробка авторів

Як видно із рис. 8, 11 мм товщина пасивного вогнезахисного покриття здатна

знижити температуру прогріву арматурних стрижнів на 120 хв вогневого впливу

вчетверо. Ця обставина вказує на ефективність використання вогнезахищених залізобетонних конструкцій і дає можливість проектувати вогнезахист залізобетонних колон залежно від забезпечення нормованих меж вогнестійкості конструкцій.

Особливість теплотехнічного розрахунку вогнезахищеної залізобетонної колони полягала у правильному задаванні теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття під час розв'язання задачі нестационарної теплопровідності. Порівняно з наявними моделями для розрахункового оцінювання вогнестійкості залізобетонних конструкцій розроблена модель дає змогу моделювати вогнезахист залізобетонних колон з урахуванням типу та теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів. Під час оцінювання точності розробленої моделі було проведено порівняння результатів чисельного моделювання прогріву залізобетонної колони з результатами експериментального дослідження вогнестійкості. Також здійснено моделювання вогнезахисту залізобетонної колони для підвищення меж вогнестійкості до нормованих значень межі вогнестійкості. Підтвердженням точності розробленої моделі є задовільна збіжність експериментальних та розрахункових температур. Особливістю розробленої кінцево-елементної моделі є можливість чисельного моделювання нестационарного прогріву вогнезахищених залізобетонних колон з урахуванням їх геометрії, характеристик матеріалів, з яких складається конструкція, класу бетону, теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів. Недоліком є те, що розрахунку піддається окремо взята залізобетонна конструкція (колона) без урахування зв'язку з іншими. Не враховується сумісна робота конструкцій будівлі чи споруди. Неможливість зняти вказані обмеження в межах цього дослідження породжує потенційно необхідний напрям подальших досліджень.

Таким чином, через розроблення моделі вогнезахищеної залізобетонної

колони та розв'язання безпосередніх задач теплопровідності з заданими граничними умовами та теплофізичними характеристиками бетону, арматури, вогнезахисного покриття можливо змодельовати вогнезахист колон. Водночас можливо моделювати вогнезахист залізобетонних колон для різних значень межі вогнестійкості та з використанням різних вогнезахисних покриттів зі своїми властивостями.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** 1. Розроблено комп'ютерну модель вогнезахищеної залізобетонної колони в програмному середовищі ЛІРА-САПР. Це дає змогу досліджувати нестационарний прогрів як вогнезахищених, так і незахищених залізобетонних конструкцій, враховує радіаційно-конвективний теплообмін у газовому середовищі від джерела теплового впливу до поверхні конструкції та теплообмін теплопровідністю у залізобетонній колоні. Водночас враховуються теплофізичні властивості матеріалів конструкції та вогнезахисних покриттів.

2. За допомогою розробленої моделі проведено моделювання нестационарного прогріву залізобетонної колони в умовах випробування за стандартного температурного режиму пожежі. Доведено працездатність розробленої моделі для оцінювання вогнестійкості залізобетонних колон та її використання під час моделювання прогріву залізобетонних конструкцій інших видів. Модель може використовуватись для проектування вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних колон у разі забезпечення їх нормованих меж вогнестійкості.

3. Запропоновано через розроблення моделі вогнезахищеної залізобетонної колони та розв'язання прямих задач теплопровідності з заданими граничними умовами і теплофізичними характеристиками бетону, арматури, вогнезахисного покриття виконувати моделювання вогнезахисту залізобетонних колон. Водночас можливо проектувати вогнезахист залізобетонних колон для

різних значень межі вогнестійкості та з використанням різних типів вогнезахисних покриттів з науково обґрунтованими параметрами. Перевірено точність розробленої моделі та доведено можливість її використання для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних колон та проєктування вогнезахисту для підвищення меж вогнестійкості до нормованих значень. Подальші

дослідження можуть бути орієнтовані на розроблення комп'ютерної моделі конструктивної схеми будівлі з використанням вогнезахисних будівельних конструкцій, виготовлених з різних матеріалів. Розвиток зазначеного дослідження полягає у розробленні методу, який би давав змогу оцінювати вогнестійкість вогнезахисних конструкцій у разі сумісної роботи.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Отрош Ю. А. Використання системи моніторингу для оцінки технічного стану будівельних конструкцій. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. 2018. № 3. С. 3–7.
2. Ковальов А. І., Отрош Ю. А., Данілін О. М. Експериментальні дослідження вогнестійкості залізобетонних перекриттів з системою вогнезахисту. *Проблеми пожежної безпеки: Зб. наук. пр.* Харків, 2019. Вип. 45. С. 73–78.
3. Korytchenko K., Samoilenko D., Dubinin D., Kucherskyi V., Krivoruchko Y. Enhancing the fire resistance of concrete structures by applying fire retardant temperature-resistant metal coatings. *In Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038 MSF. P. 500–505. doi : 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.500.
4. Nair A., Salem O. (Sam). Experimental determination of the residual compressive strength of concrete columns subjected to different fire durations and load ratios. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2020. 11(4). P. 529–543. doi : 10.1108/JSFE-10-2019-0034.
5. Song T., Bai L. Failure analysis of reinforced concrete columns after high temperature. *In Applied Mechanics and Materials*. 2012. Vol. 157. P. 1578–1581.
6. Pul S., Atasoy A., Senturk M., Hajirasouliha I. Structural performance of reinforced concrete columns subjected to high-temperature and axial loading under different heating-cooling scenarios. *Journal of Building Engineering*. 2021. 42. doi : 10.1016/j.job.2021.102477.
7. Mahmoud K. A. Fire resistance-effective parameters relationships of slender rectangular and circular RC columns. *Fire Safety Journal*. 2021. 125. doi : 10.1016/j.firesaf.2021.103442.
8. Buttignol T. E. T., Bittencourt T. N. Simplified design procedures for the structural analysis of reinforced concrete columns in fire. *Engineering Structures*. 2021. P. 246. doi : 10.1016/j.engstruct.2021.113076.
9. Peña D. L., Albero V., Ibáñez C., Hospitaller A. Sectional model for the fire evaluation of reinforced concrete columns subjected to biaxial bending. *Engineering Structures*. 2021. P. 247. doi : 10.1016/j.engstruct.2021.113094.
10. Du P., Yang Y., Tan K. H. Analytical modelling of high strength concrete columns under ambient and fire conditions. *Engineering Structures*. 2021. 247. doi : 10.1016/j.engstruct.2021.113216.
11. Buch S. H., Sharma U. K. Empirical model for determining fire resistance of Reinforced Concrete columns. *Construction and Building Materials*. 2019. 225. P. 838–852. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.183.
12. EN 1993-1-2 : 2005. Eurocode 3, Design of steel structures, Part 1.2, general rules – Structural fire design.
13. Kovalov A., Otrosh Y., Semkiv O., Konoval V., Chernenko O. Influence of the fire temperature regime on the fire-retardant ability of reinforced-concrete floors coating. *In Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1006. P. 87–92.
14. Fire resistance of reinforced concrete and steel structures: monograph / V. Sadkovi, E. Rybka, Yu. Otrosh and others. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER, 2021. 180 p.

### REFERENCES

1. Otrosh, Yu. A. (2018). Vykorystannia systemy monitorynhu dlia otsinky tekhnichnoho stanu budivelnnykh konstruksii. *Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy*, № 3, 3–7 [in Ukrainian].
2. Kovalov, A. I., Otrosh, Yu. A., Danilin, O. M. (2019). Eksperymentalni doslidzhennia vohnestiikosti zalizobetonnykh perekryttiv z systemoiu vohnezakhystu. *Problemy pozhhezhnoyi bezpeky* : Zb. nauk. pr. Kharkiv, 45, 73–78 [in Ukrainian].
3. Korytchenko, K., Samoilenko, D., Dubinin, D., Kucherskyi, V., & Krivoruchko, Y. (2021). Enhancing the fire resistance of concrete structures by applying fire retardant temperature-resistant metal coatings. *In Materials Science Forum*, 1038 MSF, 500–505. doi : 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.500 [in English].
4. Nair, A., & Salem, O. (Sam). (2020). Experimental determination of the residual compressive strength of concrete columns subjected to different fire durations and load ratios. *Journal of Structural Fire Engineering*, 11(4), 529–543. doi : 10.1108/JSFE-10-2019-0034 [in English].
5. Song, T., Bai, L. L. (2012). Failure analysis of reinforced concrete columns after high temperature. *In Applied Mechanics and Materials*, 157, 1578–1581 [in English].
6. Pul, S., Atasoy, A., Senturk, M., & Hajirasouliha, I. (2021). Structural performance of reinforced concrete columns subjected to high-temperature and axial loading under different heating-cooling scenarios. *Journal of Building Engineering*, 42. doi : 10.1016/j.job.2021.102477 [in English].
7. Mahmoud, K. A. (2021). Fire resistance-effective parameters relationships of slender rectangular and circular RC columns. *Fire Safety Journal*, 125. doi : https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103442 [in English].
8. Buttignol, T. E. T., & Bittencourt, T. N. (2021). Simplified design procedures for the structural analysis of reinforced concrete columns in fire. *Engineering Structures*, 246. doi : 10.1016/j.engstruct.2021.113076 [in English].

9. Peña, D. L., Albero, V., Ibáñez, C., & Hospitaler, A. (2021). Sectional model for the fire evaluation of reinforced concrete columns subjected to biaxial bending. *Engineering Structures*, 247. doi : 10.1016/j.engstruct.2021.113094 [in English].
10. Du, P., Yang, Y., & Tan, K. H. (2021). Analytical modelling of high strength concrete columns under ambient and fire conditions. *Engineering Structures*, 247. doi : 10.1016/j.engstruct.2021.113216 [in English].
11. Buch, S. H., & Sharma, U. K. (2019). Empirical model for determining fire resistance of Reinforced Concrete columns. *Construction and Building Materials*, 225, 838–852. doi : 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.183 [in English].
12. EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3, Design of steel structures, Part 1.2, general rules – Structural fire design [in English].
13. Kovalov, A., Otrosh, Y., Semkiv, O., Konoval, V., Chernenko, O. (2020). Influence of the fire temperature regime on the fire-retardant ability of reinforced-concrete floors coating. *In Materials Science Forum*, 1006, 87–92. [in English].
14. Fire resistance of reinforced concrete and steel structures: monograph / V. Sadkovyi, E. Rybka, Yu. Otrosh and others. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER, 2021, 180 p. [in English].

## SIMULATION OF UNSTATIONARY HEATING OF FIREPROOF REINFORCED CONCRETE COLUMNS

A. Kovalov<sup>1</sup>, R. Purdenko<sup>2</sup>, Yu. Otrosh<sup>1</sup>, V. Tomenko<sup>3</sup>, N. Rashkevich<sup>1</sup>, S. Yurchenko<sup>4</sup>

<sup>1</sup>National University of Civil Defence of Ukraine, Ukraine

<sup>2</sup>Private enterprise «ProjectBudStar», Ukraine

<sup>3</sup>Cherkassy institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine

<sup>4</sup>Cherkasy Scientific Research Forensic Centre of the Ministry of Internal Affairs in Ukraine, Ukraine

---

### KEYWORDS: ANNOTATION

fire resistance,  
simulation of non-  
stationary heating,  
reinforced  
concrete column,  
fire protection,  
fireproof coating,  
LIRA-SAPR

The analysis of the results of studies of the fire resistance of reinforced concrete structures was carried out and it was established that the existing approaches to the assessment of fire resistance do not always allow obtaining optimal solutions for the thermal engineering calculation of a fire-resistant reinforced concrete column. Creation of foundations for effective assessment of fire resistance of fire-resistant reinforced concrete building structures with scientifically based parameters of fire-resistant coatings is an urgent problem. Solving this problem will lead to an increase in the accuracy of thermal engineering calculation of fire-resistant reinforced concrete columns with the accuracy required for engineering calculations. In this regard, the authors developed a finite element model for simulating non-stationary heating of a fire-resistant reinforced concrete column. The model allows you to evaluate the fire resistance of both unprotected and fire-protected reinforced concrete columns, take into account the properties of the column material and the material of the fire-resistant coating. The evaluation algorithm includes the implementation of experimental and calculation procedures when determining the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete columns. The authors modeled the non-stationary heating of a fire-resistant reinforced concrete column at the standard fire temperature regime using the developed model. The determination of the thermophysical characteristics of the fire-resistant coating when solving the problem of non-stationary thermal conductivity is a feature of modeling the non-stationary heating of a fire-resistant reinforced concrete column. When determining the effectiveness of the developed model, a comparison was made of the results of numerical modeling of the heating of a reinforced concrete column with the results of an experimental study of the fire resistance of a reinforced concrete column. The authors proposed modeling the fire protection of a reinforced concrete column to increase the fire resistance limits to the required values of the fire resistance limit. The adequacy of the developed model is confirmed by the satisfactory convergence of the experimental and calculated temperatures. The possibility of modeling non-stationary heating of fire-resistant reinforced concrete columns taking into account their initial and boundary conditions, geometry, material characteristics, concrete class, reinforcement class, thermophysical characteristics of fire-resistant coatings, test conditions and heating conditions is a feature of the developed finite element model.