

УДК 614.841.332

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2024.8.1.5.22>

**Андрій КОВАЛЬОВ<sup>1</sup>**, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
(ORCID 0000-0002-6525-7558),

**Іван ТАРАНЕНКО<sup>2</sup>** (ORCID 0009-0001-1702-0820),

**Сергій ЮРЧЕНКО<sup>3</sup>** (ORCID 0000-0002-2775-238X),

**Віталій ТОМЕНКО<sup>1</sup>**, кандидат технічних наук, доцент (ORCID 0000-0001-7139-9141),

**Олександр ЧЕРНЕНКО<sup>1</sup>**, кандидат медичних наук, доцент

(ORCID 0000-0002-8621-3175),

<sup>1</sup>Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля

Національного університету цивільного захисту України,

<sup>2</sup>Національний університет цивільного захисту України,

<sup>3</sup>Черкаський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України

## МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ БУДІВЕЛЬ ІЗ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Проведено оцінку вогнестійкості будівлі із будівельних конструкцій, які захищені від вогню вогнезахисними покриттями. Ця методика базується на використанні математичної моделі та розрахунково-експериментального методу для визначення вогнестійкості залізобетонних конструкцій. Також створена комп'ютерна модель для аналізу теплового та напружено-деформованого стану будівлі із вогнезахисних будівельних конструкцій (на прикладі триповерхового паркінгу для автомобілів). Модель враховує властивості вогнезахисних покриттів, теплофізичні та механічні характеристики матеріалів, які використовуються у конструкції, а також нелінійні закони деформації матеріалів при високих температурах та під впливом силових навантажень. Модель дозволяє визначити клас вогнестійкості будівельних конструкцій із застосуванням вогнезахисних покриттів різних типів. Проведено аналіз варіантів пожежі для дослідження вогнестійкості (стійкості) будівлі в залежності від місця виникнення та пожежного навантаження на залізобетонні конструкції будівлі паркінгу для автомобілів. Проведено оцінювання вогнестійкості вогнезахисної будівельної конструкції за допомогою розроблених моделей. Проведено оцінювання вогнестійкості будівлі із вогнезахисних будівельних конструкцій. Запропоновано заходи з підвищення меж вогнестійкості конструкцій, що полягають у використанні вогнезахисних покриттів з науково обґрунтованими параметрами. Обґрунтовано товщину пасивного вогнезахисного покриття, коефіцієнт теплопровідності, питому теплоємність, які необхідно задавати при оцінюванні вогнестійкості вогнезахисної залізобетонної колони та підвищенні меж вогнестійкості до 180 хв. При чисельних розрахунках нестационарного прогріву вогнезахисної залізобетонної колони паркінгу (товщина покриття 11 мм) за умов впливу стандартної пожежі протягом 180 хв. встановлено, що температура на арматурних стрижнях досягла 213 °С, що в 4 рази менше від прогріву незахищеної колони.

**Ключові слова:** вогнезахисні залізобетонні конструкції, оцінювання вогнестійкості, чисельне моделювання, вогнезахист, ЛІРА-САПР

**Вступ.** Оцінка меж вогнестійкості будівельних конструкцій, незалежно від того, чи вони оброблені вогнезахисними системами, може бути проведена за допомогою розрахункових методів або шляхом експериментальних випробувань на вогнестійкість [1]. Однак, не зважаючи на існуючі вимоги до впливу температури, на практиці часто

не враховують ці вимоги, що може призвести до серйозних економічних збитків [2]. Розвиток методів для оцінки вогнестійкості конструкцій, зокрема у вирішенні теплотехнічних завдань, став можливим завдяки використанню передового комп'ютерного програмного забезпечення [3].

Використання розрахункових методів оцінювання вогнестійкості незахищених та вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій, порівняно з експериментальним, має ряд переваг [4, 5]. Переваги полягають у можливості проведення розрахунків без великих матеріальних затрат [6, 7]. Однак повинні бути сертифіковані програмні продукти, які коштують дорого. Також висококласні спеціалісти, що зможуть правильно і обґрунтовано задавати параметри при моделюванні вогнезахищених будівельних конструкцій.

Недоліки в формулюванні початкових та граничних умов, а також у застосуванні математичних та фізичних моделей для процесів, що відбуваються під впливом тепла від пожежі, можуть призвести до неточностей у оцінці вогнестійкості будівельних конструкцій, які захищені від вогню. Це може вплинути на правильність проектування будівель та споруд із використанням таких конструкцій.

Вимоги стійкості будівель та споруд забезпечуються комплексом заходів, що передбачаються як технологією виробництва, так і застосуванням будівельних конструкцій з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів, які представлені широким спектром. Детальне вивчення характеристик та параметрів покриттів є важливим аспектом аналізу. Тому створення основ для ефективного оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій, що захищені від вогню, з використанням науково обґрунтованих параметрів покриттів, представляє собою актуальне завдання. Розв'язання цієї проблеми призведе до підвищення рівня надійності вогнестійкості будівель та споруд під впливом високих температур і механічних навантажень.

***Аналіз літературних даних та постановка проблеми.*** Забезпечення нормованого значення межі вогнестійкості несучих елементів залізобетонних будівельних конструкцій є важливою і досить складною проблемою, розв'язання якої дозволить на стадії проектування, будівництва та експлуатації будівель і споруд застосовувати у сучасному будівництві конструкції, які здатні забезпечити стійкість об'єкту при високотемпературному впливі або при руйнуванні внаслідок порушення нормальних умов його функціонування.

В [8] наведені результати оцінювання вогнестійкості збірних залізобетонних балок-колон, які з'єднуються по торцям з залізобетонними плитами і поєднуються у збірну залізобетонну каркасну конструкцію. Для перевірки точності побудованої моделі вогнестійких конструкцій використовувався виключно обчислювальний експеримент. Ця оцінка враховувала конструкції без системи вогнезахисту. Такий підхід обумовлений складнощами створення комп'ютерної моделі вогнезахищених конструкцій у таких системах, а також правильним встановленням параметрів вогнезахисних матеріалів. Це обмежує можливість використання моделі для оцінки каркасних конструкцій, що мають вогнезахисне покриття з параметрами, які мають науково обґрунтовані основи.

В [9] розроблена методика щодо оцінювання вогнестійкості залізобетонних перекриттів. Розвинуто методологію щодо застосування підходів до розрахунку меж вогнестійкості на основі методу кінцевих різниць. Запропоновані для врахування в методиці вимоги до матеріалів, граничних умов, розрахункових схем, сіткових моделей, а також критеріальна база щодо настання граничних станів. Однак така методика не може бути використана для вогнезахищених залізобетонних конструкцій

будівлі. Можливо, це може бути пов'язано з відсутністю достовірних даних щодо властивостей вогнезахисних покриттів.

В [10] надано опис теоретичних основ та основних гіпотез щодо моделювання різних типів скінчених елементів будь-якої структури при впливі температури пожежі за допомогою програмного комплексу SAFIR. У роботі пояснюється, як використовувати програмне забезпечення у повному обсязі. Хоча ці результати мають практичне значення, але не були достатньо розглянуті питання, пов'язані із розрахунками вогнезахисних залізобетонних конструкцій будівлі в цілому. Очевидно це пов'язано з труднощами побудови вогнезахисної конструкції в даному програмному комплексі і правильному задаванні параметрів вогнезахисних матеріалів.

У минулому визначення вогнестійкості колон традиційно проводилося експериментальним методом і базувалося на табличних значеннях, отриманих експериментально під час проєктування [11]. Однак на сьогоднішній день було впроваджено новий підхід, який враховує ключові характеристики колони під час пожежі. Були розроблені рівняння для передбачення вогнестійкості колон. Незважаючи на значний прогрес у розумінні взаємозв'язку між вогнестійкістю залізобетонних колон та загальною стійкістю будівлі, залишаються невирішеними питання оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій будівлі за допомогою сучасних програмних комплексів.

В [12] приведені результати параметричного дослідження поведінки бетонних балок під впливом вогню. Дається уявлення про поведінку бетонних балок, що піддаються впливові теплових і механічних навантажень. Розглядаються прогини конструкцій внаслідок теплового впливу. В [13] представлені результати чисельного дослідження характеристик сталезалізобетонного композитного перекриття, що було піддано пожежі, шляхом проведення тривимірного термомеханічного аналізу з використанням програми «ANSYS». Порівнюючи результати реальної пожежі з результатами чисельного моделювання встановлено точність застосування чисельних моделей для прогнозування впливу температури пожежі на поведінку конструкцій. В тексті зроблено вказівки на проблеми, які ще залишаються невирішеними у сфері вогнестійкості залізобетонних конструкцій та наголошується на обмеженості та відсутності певних аспектів в дослідженнях. По суті, розглянуті статті [14–15] вказують на певні досягнення у вивченні вогнестійкості залізобетонних конструкцій, але також вказують на прогалини у вивченні певних аспектів.

Автори статті [14] описують вплив сценаріїв пожежі на стійкість залізобетонної каркасної конструкції та використання комп'ютерної програми SAFIR для аналізу різних сценаріїв пожежі. Автори статті [15] розглядають основи та поточний стан досліджень вогнестійкості залізобетонних конструкцій. Проте, в цих роботах не знайшли відображення питання оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій з використанням сучасних програмних засобів.

Загальна тенденція цих досліджень полягає в тому, що не вистачає достатніх програмних комплексів для оцінки вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. Дослідники вказують на необхідність створення адекватних комп'ютерних моделей, які б дозволяли моделювати прогрівання та поведінку вогнезахисних конструкцій під впливом пожежі.

Загальний висновок полягає у відсутності належних методів та програмних засобів для оцінки вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. Науковці вказують на необхідність створення комплексних моделей, які б враховували різні температурні режими пожежі та параметри матеріалів конструкцій.

Цей напрямок досліджень залишається актуальним і вимагає подальших наукових зусиль для розв'язання проблем визначення вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є розробка методики оцінювання вогнестійкості незахищених та вогнезахищених будівельних конструкцій шляхом врахування особливостей впливу високих температур та механічного навантаження на вогнестійкість конструкцій. Це дає можливість здійснити аналіз теплового та напружено-деформованого стану незахищених будівельних конструкцій будівлі та розробити пропозиції з підвищення меж вогнестійкості конструкцій за допомогою вогнезахисних покриттів з науково обґрунтованими параметрами.

Для досягнення поставленої мети потребували розв'язання такі завдання:

– побудувати скінченно-елементні моделі теплового та напружено-деформованого стану вогнезахищених будівельних конструкцій в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» (Україна);

– провести аналіз варіантів пожеж для дослідження вогнестійкості (стійкості) будівлі в залежності від місця виникнення та пожежного навантаження на залізобетонні конструкції;

– провести оцінювання вогнестійкості вогнезахищеної будівельної конструкції, а також будівлі за допомогою розроблених моделей;

– розробити методику оцінювання вогнестійкості вогнезахищених будівельних конструкцій.

#### **Матеріали та методи дослідження**

**Матеріали, що піддавалися випробуванню.** Об'єктом дослідження було обрано 3-ох поверховий паркінг – монолітно-каркасну будівлю, виконану із монолітного залізобетону. Вибір об'єкту дослідження обґрунтовано тим фактом, що пожежі в паркінгах для автомобілів характеризуються швидким поширенням пожежі всередині автомобіля. Це створює передумови для лавиноподібного поширення вогню на інші автотранспортні засоби, загрози людям в умовах замкнутого простору, а також можливого вибуху і руйнування конструкцій. Пожежна безпека паркінгів (підземних автостоянок) – проблема, яка повинна вирішуватися комплексно, з урахуванням всіх факторів ризику і способів їх мінімізації.

**Обчислювальний експеримент щодо оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій.** Для обробки даних використовувались результати розрахунків теплового та напружено-деформованого станів вогнезахищених залізобетонних (перекриттів, колон) будівельних конструкцій [16], які використано при оцінюванні вогнестійкості залізобетонних конструкцій на прикладі паркінгу із вогнезахищених конструкцій. Схема будівлі – це повний зв'язковий каркас загальною місткістю 124 паркомісця під легкові автомобілі (з них на 1-му поверсі 56), схема 1-го поверху зображена на рис. 1.



На рис. 2 показано створену в програмному комплексі ЛІРА-САПР скінченно-елементну модель триповерхового паркінгу, задані навантаження на конструкції паркінгу. Модель складається з 49105 елементів та 40070 вузлів. Навантаження на плиту прийняті: постійне –  $0,55 \text{ т/м}^2$ , тимчасове –  $0,96 \text{ т/м}^2$ , із них довготривале –  $0,6 \text{ т/м}^2$ , короткочасне  $0,36 \text{ т/м}^2$ . Змодельованим елементам скінченно-елементної моделі було призначено типи жорсткості, як зображено на рис. 3.

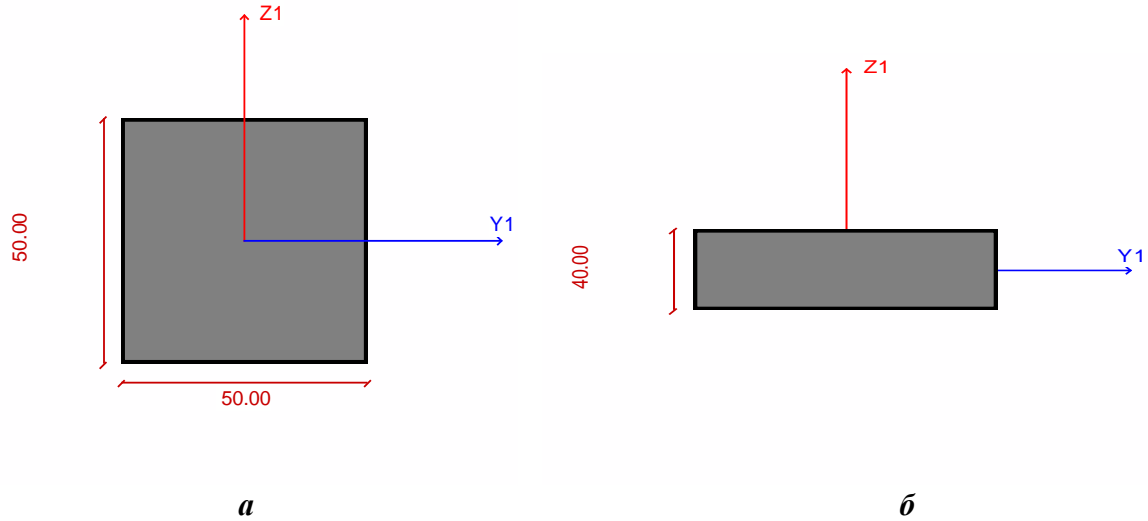


Рисунок 3 – Жорсткість колон «Брус  $50 \times 50$ » (а) та перекриттів «Пластина Н 40» (б)

На рис. 4 показано створену в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» скінченно-елементну модель триповерхового паркінгу, задані навантаження на конструкції паркінгу.

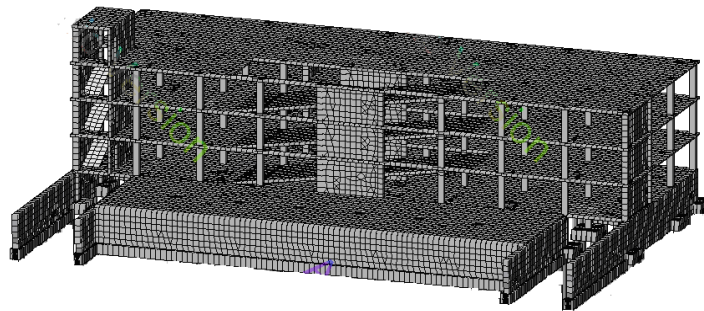


Рисунок 4 – Скінченно-елементна 3D модель триповерхового паркінгу

**Аналіз варіантів пожеж для дослідження вогнестійкості (стійкості) будівлі паркінгу.** Було проведено моделювання варіантів пожеж для дослідження вогнестійкості (стійкості) будівлі в залежності від місця виникнення та пожежного навантаження на вогнезахиснені залізобетонні конструкції будівлі паркінгу (рис. 5).

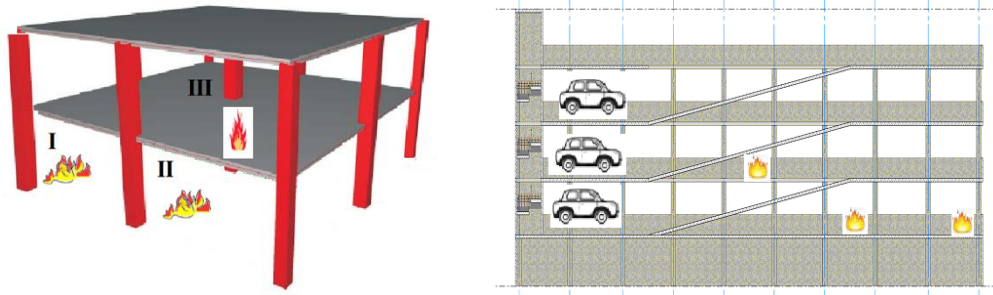


Рисунок 5 – Варіанти розрахункових сценаріїв виникнення пожежі в паркінгу: I – біля лівої колони; II – біля крайньої центральної колони; III – біля центральної колони в центрі паркінгу

В результаті чисельного моделювання було встановлено місце виникнення пожежі, наслідки якої призведуть до найбільших значень зусиль та навантажень в конструкціях, що призведуть до втрати несучої здатності конструкцій, і, як наслідок, до втрати загальної стійкості будівлі паркінгу (рис. 6).

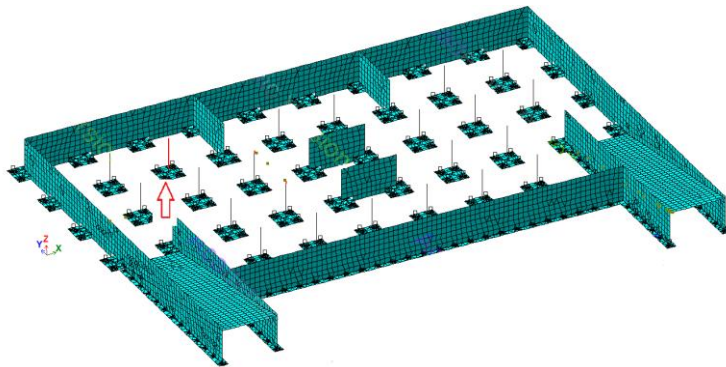


Рисунок 6 – Місце виникнення пожежі, наслідки якої призведуть до найбільших значень зусиль та навантажень в конструкціях

Для розрахунків нерівномірних розподілів температури в поперечному перерізі вогнезахисної залізобетонної колони застосовували математичну модель нестационарної теплопровідності, математичний апарат якої використано в програмі ЛПА-САПР. Модель – це диференційне рівняння теплопровідності, яка враховує радіаційно-конвективний теплообмін від газового середовища до обігрівних поверхонь колони (обігрів з 4-ох сторін) (граничні умови III-го роду), теплообмін теплопровідністю в колоні. Для вирішення рівняння теплопровідності застосовувався метод скінченних елементів у програмі «ЛПА-САПР». Розрахунок був проведений з урахуванням фізичної нелінійності, враховуючи параметри, що змінюються в процесі. Для врахування цієї нелінійності використовувався простий кроковий метод у програмному комплексі «ЛПА-САПР» з використанням 30 кроків. Був вибраний закон нелінійного деформування бетону з програмного комплексу «ЛПА-САПР», який є кусково-лінійним законом деформування з кодом 1501.

**Оцінювання вогнестійкості вогнезахисної будівельної конструкції, а також будівлі за допомогою розроблених моделей.** Під час моделювання нестационарного прогріву залізобетонної колони в програмному комплексі «ЛПА-САПР» використана модель колони (рис. 7).

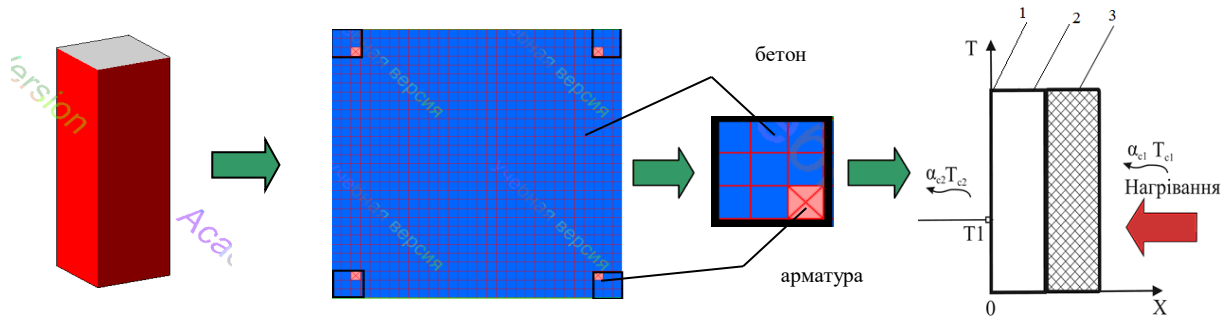


Рисунок 7 – Комп’ютерна модель колони

Задані параметри бетону та сталі з’ясовують шляхом розв’язання обернених задач теплопровідності (табл. 1-2).

Таблиця 1 – Значення коефіцієнту теплопровідності бетону

Температура, °C	Коефіцієнт теплопровідності бетону $\lambda_b$ , Дж/(м·с·°C)
0	2
500	1,08
1000	0,6
1200	0,6

Таблиця 2 – Значення теплоємності бетону

Температура, °C	Питома теплоємність бетону $c$ , Дж/(кг·°C)
0	900
100	2000
200	1000
400	1100
1000	1100

Теплофізичні і механічні характеристики бетону задані залежними від температури. Коефіцієнти тепловіддачі і теплового випромінювання задані константами. Початкова температура конструкції 6 °C.

Питома вага покриття  $R_0=500 \text{ кг/м}^3=4903,325 \text{ Н/м}^3$  (дані виробника).

Питома вага сталі,  $R_0 = 7850 \text{ кг/м}^3=76982,2 \text{ Н/м}^3$ .

Питома вага бетону  $R_0 = 2300 \text{ кг/м}^3=22555,3 \text{ Н/м}^3$ .

$\sigma$  – стала Стефана Больцмана,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C}^4)$ .

$\theta_0$  – початкова температура,  $\theta_0 = 6 \text{ °C}$ .

коефіцієнт Пуассона сталі  $\nu=0,3$ , початковий модуль пружності сталі  $E_s=2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ .

Початковий модуль пружності бетону  $29 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ .

В програмі «ЛІРА-САПР» реалізовані підходи, засновані на тому, що якщо необхідно підвищити межу вогнестійкості залізобетонної колони до нормованих значень, то це досягається проектуванням додаткової арматури. У випадку якщо необхідно підвищити межу вогнестійкості колони з 150 до 180 хвилин площа армування збільшується в 10 разів. Так при забезпеченні межі вогнестійкості 150 хв залізобетонної колони квадратного перерізу, розмірами  $0,5 \times 0,5 \times 3 \text{ м}$  максимальна площа армування складає  $5,55 \text{ см}^2$ . При забезпеченні межі вогнестійкості 180 хв та сама колона потребує збільшення максимальної площі армування до  $58,7 \text{ см}^2$ . Такі підходи мають місце при проектуванні будівель та споруд, проте взагалі не прийнятні при



експлуатації вже побудованих будівель та при необхідності підвищення меж вогнестійкості залізобетонних конструкцій до нормованих значень.

Цього можливо досягнути використанням вогнезахисних покриттів з науково обґрунтованими параметрами: товщиною, видом покриття (реактивне, пасивне), теплофізичними характеристиками (коефіцієнт теплопровідності, теплоємність).

На рис. 8 показано діалогове вікно програми «ЛІРА-САПР» для задавання режимів пожежі, властивостей бетону, арматури.

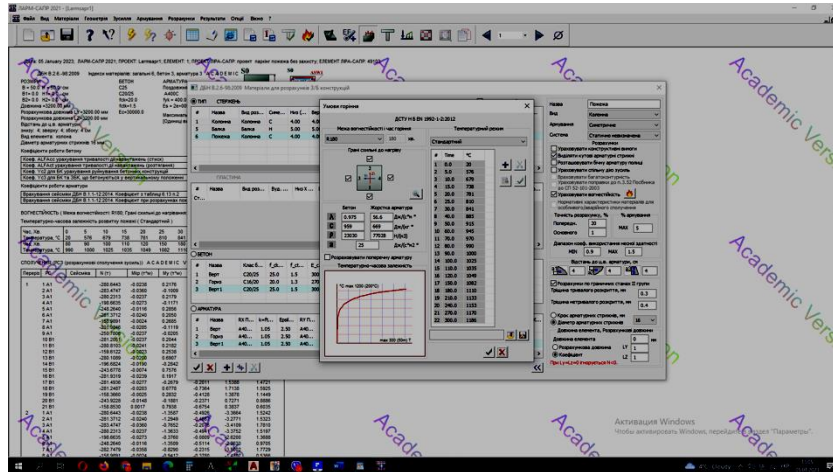


Рисунок 8 – Діалогове вікно програми «ЛІРА-САПР» для задавання режимів пожежі, властивостей бетону, арматури

На рис. 9 а показано результати чисельного моделювання залізобетонної колони квадратного перерізу, розмірами  $0,5 \times 0,5 \times 3$  м та температура в арматурних стрижнях (рис. 9 б) в умовах впливу стандартного температурного режиму пожеж.

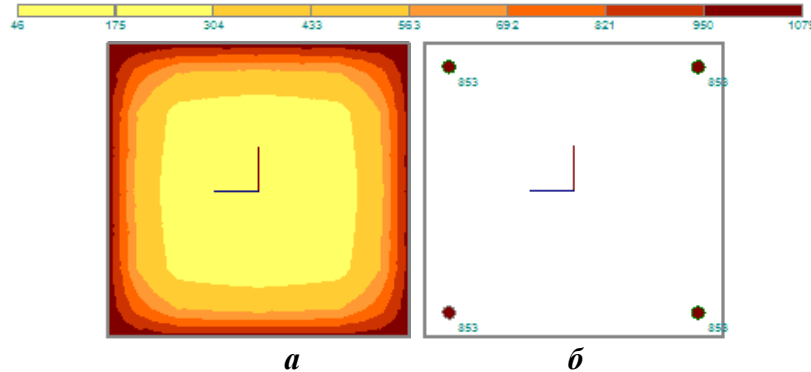


Рисунок 9 – Розподіл температур у залізобетонній колоні (а) та арматурних стрижнях (б) на 150 хвилин випробування

Як видно із рис. 9 температура на арматурних стрижнях досягає  $853^{\circ}\text{C}$ , що є достатнім для забезпечення вогнестійкості R 150 при даних розрахункових зусиллях в колоні.

Мозаїка переміщень по вісі Z при цьому незначна та складає 1,1мм.

В разі підвищення межі вогнестійкості колони до 180 хвилин розподіл температур в перерізі та на арматурних стрижнях буде становити, як показано на рис. 10.

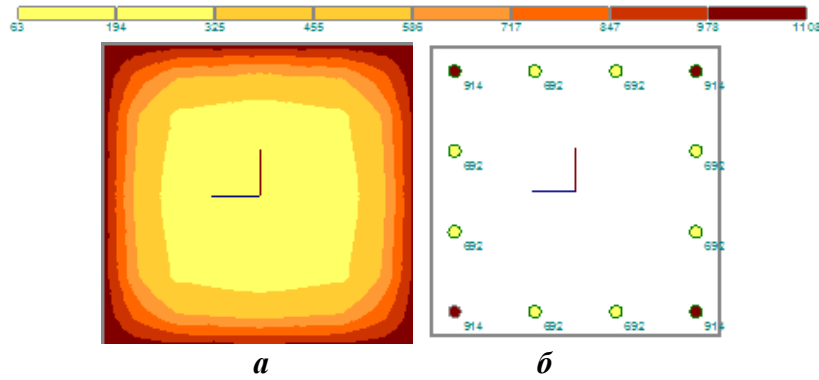


Рисунок 10 – Розподіл температур у залізобетонній колоні (а) та арматурних стрижнях (б) на 180 хвилині випробування

Як видно із рис. 10 температура на кутових арматурних стрижнях досягає 914 °С, та з'являється додаткова арматура. Це вказує на те, що існуючої арматури недостатньо для забезпечення вогнестійкості R180 при таких розрахункових зусиллях в колоні. Тому наступним кроком було підвищення вогнестійкості залізобетонної колоні до нормованих значень межі вогнестійкості 180 хвилин за допомогою використання вогнезахисних покриттів.

Для підвищення межі вогнестійкості залізобетонної колоні до 180 хв розмірами 0,5×0,5×3 м можливе застосування вогнезахисних покриттів з науково обґрунтованими параметрами. До таких параметрів слід віднести: вид, товщину вогнезахисного покриття, місця нанесення та умови експлуатації. Для підвищення вогнестійкості залізобетонних конструкцій найбільш ефективні та переважно використовуються пасивні вогнезахисні покриття. Було обрано таке пасивне вогнезахисне покриття, коефіцієнт теплопровідності якого знайдено в роботах [17–18]. Питома об'ємна теплоємність покриття була знайдена завдяки розв'язанню обернених задач теплопровідності і склала  $C_v=10^6$  Дж/м<sup>3</sup>·°С.

Використовуючи теплофізичні характеристики покриття, проведено моделювання вогнезахисту залізобетонної колоні. В результаті проведених досліджень встановлено, що для підвищення межі вогнестійкості залізобетонної колоні розмірами 500×500 мм до 180 хвилин необхідно запроєктувати вогнезахист у вигляді вогнезахисного покриття з заданими параметрами арматури і бетону. При цьому, товщина вогнезахисного покриття повинна складати 11 мм на основі розв'язання прямих задач теплопровідності у програмному комплексі FRIEND.

В результаті чисельного моделювання були отримані розподіли температур у вогнезахисній залізобетонній колоні на 180 хв. вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі при обігріві колоні з чотирьох сторін (рис. 11).

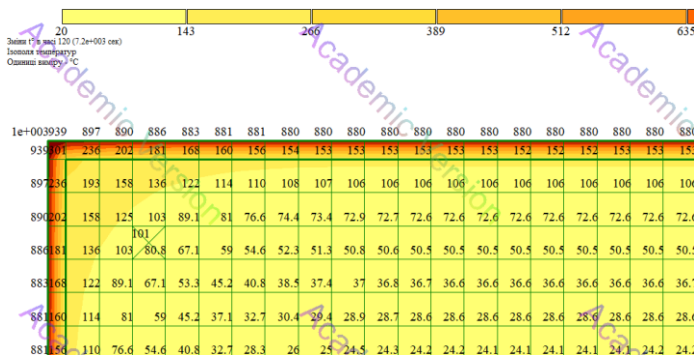


Рисунок 11 – Розподіл температур в вогнезахисній залізобетонній колоні на 180 хвилині випробування



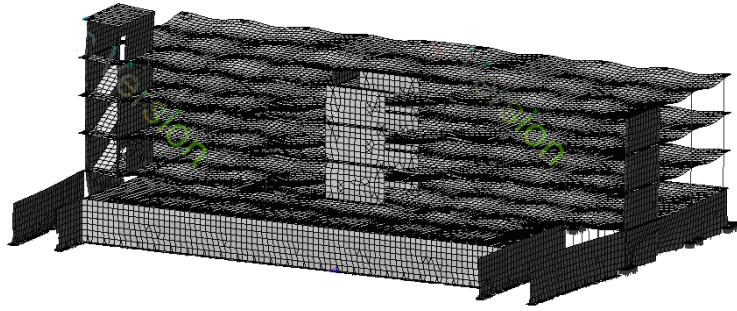


Рисунок 13 – Результати розрахунку межі вогнестійкості конструкцій за розрахунковим сценарієм виникнення пожежі в паркінгу (I)

На рис. 14 представлена мозаїка переміщень по  $Z(G)$ .

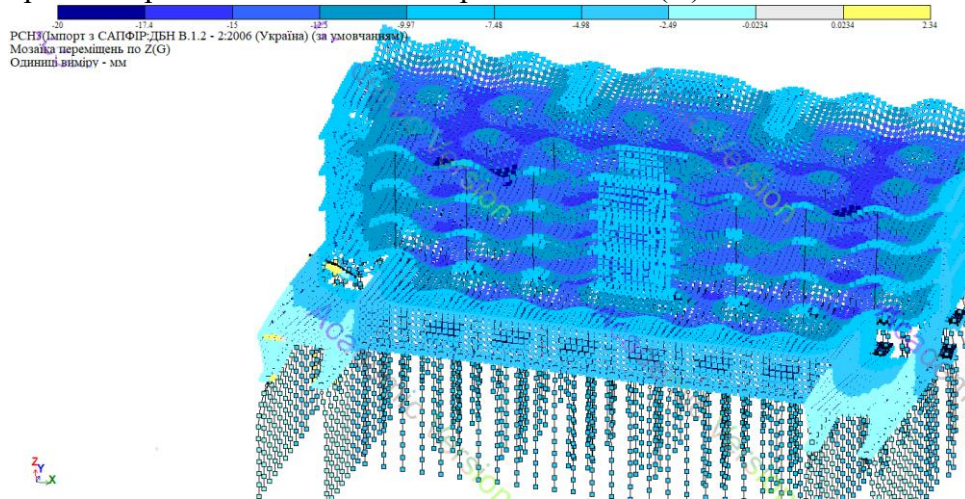


Рисунок 14 – Мозаїка переміщень по  $Z(G)$

В результаті проведених розрахунків встановлено, що кожна будівля є індивідуальною в плані архітектурно-планувальних і конструктивних рішень. В свою чергу це свідчить про те, що не існує єдиного правильного варіанту як при прогнозуванні втрати вогнестійкості і, як наслідок, втрати несучої здатності будівельних конструкцій і будівлі в цілому, так і при застосуванні заходів по забезпеченню вогнестійкості вогнезахисених будівельних конструкцій. Це підтверджується результатами чисельного моделювання будівлі паркінгу в програмному комплексі «ЛІРА-САПР».

**Методика оцінювання вогнестійкості вогнезахисених будівельних конструкцій.** Отримані результати дозволяють проводити комплекс робіт по забезпеченню загальної стійкості будівлі від прогресуючого обвалення як внаслідок пожежі, так і при інших впливах на конструкції будівлі (вибух, артилерійський обстріл, терористичний акт). Цього можливо досягнути моделюючи впливи, зазначені вище, у вигляді виключення однієї або декількох конструкцій з роботи конструктивної схеми будівлі.

Таким чином, методика оцінювання вогнестійкості вогнезахисених будівельних конструкцій включає в себе:

– **вибір** математичної моделі: вхідні (початкові) дані, початкові умови, граничні умови, рівняння, вихідні дані, розв'язання обернених задач теплопровідності, алгоритм, ідентифікація, збіжність результатів (аналіз невизначеностей), верифікація (ідентифікація та кількісне визначення похибки в розрахунковій моделі), валідація

(процес визначення ступеня точності), аналіз чутливості, обчислювальний експеримент;

– побудову скінченно-елементної моделі: побудова геометричної моделі (вибір типу перерізу конструкції, просторовий вигляд моделі: 1D, 2D чи 3D, вибір кількості вузлів та елементів, крок сітки (обов'язково він повинен бути більшим за максимальний діаметр робочого арматурного стержня), вибір номера ознаки схеми, підбір і перевірка арматурних стержнів, крок розбиття перерізу, часовий крок, типи жорсткості, зовнішнє навантаження);

– **задавання фізичних властивостей матеріалів:** задавання теплофізичних характеристик бетону та вогнезахисного покриття (коефіцієнт теплопровідності, теплоємність, густина, коефіцієнт конвективного теплообміну), вибір температурного режиму пожежі; задавання міцнісних та деформаційних властивостей матеріалів, задавання навантаження на конструкцію, власна вага, умови закріплення зразка, схема защемлення зразка, вибір закону нелінійного деформування матеріалів конструкції (бетону і арматури), якщо не відповідає, то вибираємо інший;

– **моделювання процесу** (теплотехнічний та статичний розрахунки);

– **аналіз результатів:** розподіл температури по перетину конструкції, зміна фізичних характеристик бетону та арматури в залежності від температури прогріву перетину: модуль пружності бетону при різних температурах, коефіцієнт лінійної температурної деформації бетону, гранична відносна деформація бетону;

– перевірка з результатами **випробувань на вогнестійкість:** вид конструкції (горизонтальна, вертикальна), кількість зразків і випробувань, умови випробувань (температурний режим), кріплення зразків в печі, кількість термопар для вимірювання температури в печі і на зразках для випробування, вид вогнезахисного покриття (реактивне, пасивне), умови навантаження, прилади для вимірювання навантаження та деформацій зразка.

**Обговорення результатів оцінювання вогнестійкості будівлі із вогнезахищених будівельних конструкцій.** Мета роботи вирішувалась шляхом розкриття особливостей впливу високих температур та механічного навантаження на стійкість будівель (на прикладі паркінгу для автомобілів) із захищених і вогнезахищених залізобетонних конструкцій (перекрыттів, колон) за допомогою розробленої комп'ютерної моделі в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» (Україна). За допомогою розробленої моделі з'являється можливість здійснити аналіз теплового та напружено-деформованого стану захищених будівельних конструкцій будівлі. На підставі аналізу можливо розробити пропозиції з підвищення меж вогнестійкості конструкцій за допомогою вогнезахисних покриттів з обґрунтованими параметрами для підвищення рівня пожежної безпеки будівель. Описано, що результати чисельного моделювання нестационарного прогріву вогнезахищеної залізобетонної колони були отримані завдяки розробці адекватної моделі в програмному комплексі «ЛІРА-САПР». Ця модель дозволяє проводити моделювання нестационарного прогріву залізобетонних колон з урахуванням їх геометрії, матеріалів, з яких вони складаються, класу бетону та теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів.

Розроблена модель була порівняна з результатами експериментальних досліджень вогнестійкості. Показано, що розрахунки моделі відповідають експериментальним температурам. Особливістю цієї моделі є можливість чисельного моделювання нестационарного прогріву вогнезахищених залізобетонних конструкцій, що дозволяє оцінювати вогнестійкість будівель та споруд.

Цей підхід також враховує можливість оцінки вогнестійкості не лише окремих конструкцій, а й будівель загалом, використовуючи вогнезахиснені залізобетонні конструкції з параметрами, підтвердженими науковими дослідженнями.

Необхідно зазначити, що недоліком розробленої скінченно-елементної моделі в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» (Україна) є відсутність достовірних даних щодо теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів. Їх потрібно визначати кожного разу для конкретного типу вогнезахисного покриття розв'язанням обернених задач теплопровідності. При цьому теплофізичні характеристики вогнезахисних покриттів необхідно визначати залежними від температури та тривалості вогневого впливу.

Це не завжди задовольняє вимоги щодо достовірності результатів розрахунків і може призвести до помилкового визначення вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій. Неврахування вказаних параметрів при побудові скінченно-елементної моделі та прогнозуванні вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій накладає деякі обмеження на використання отриманих результатів, що може трактуватися як недоліки даного дослідження. Розвиток даного дослідження може полягати у розробці універсального методу, який би враховував можливість оцінювання вогнестійкості будівель та споруд при сумісній роботі як сталевих, так і залізобетонних вогнезахисних і незахищених будівельних конструкцій. При цьому можуть виникати труднощі математичного характеру, що полягають у коректній побудові опису процесу нестационарного прогріву вогнезахисних будівельних конструкцій при їхній сумісній роботі в конструктивній схемі будівлі.

### **Висновки**

1. Розроблено скінченно-елементні моделі теплового та напружено-деформованого стану вогнезахисних будівельних конструкцій в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» (Україна) (на прикладі триповерхового паркінгу для автомобілів), що враховують наявність вогнезахисних конструкцій. Моделі дозволяють враховувати такі параметри: теплофізичні характеристики вогнезахисних покриттів та матеріалів, нелінійні закони деформування матеріалів, механічні властивості матеріалів при високих температурних та силових впливах.

2. Проведено аналіз варіантів пожеж для дослідження вогнестійкості (стійкості) будівлі в залежності від місця виникнення та пожежного навантаження на вогнезахиснені залізобетонні конструкції будівлі паркінгу для автомобілів. В результаті встановлено місце виникнення пожежі, наслідки від якої призведуть до найбільших значень зусиль та навантажень в конструкціях, що призведуть до втрати несучої здатності конструкцій, і, як наслідок, до втрати загальної стійкості будівлі паркінгу.

3. Проведено моделювання нестационарного прогріву залізобетонної колони паркінгу квадратного перерізу, розмірами  $0,5 \times 0,5 \times 3$  м за умов впливу стандартної пожежі протягом 150 хвилин. При цьому встановлено, що температура на арматурних стрижнях досягає  $853$  °С, що є достатнім для забезпечення вогнестійкості R150 при даних розрахункових зусиллях в колоні, а мозаїка переміщень по вісі Z була незначною та складала  $1,1$  мм. Максимальна площа армування складала  $5,55$  см<sup>2</sup>. При забезпеченні вогнестійкості R180 при даних розрахункових зусиллях в колоні температура на кутових арматурних стрижнях досягла  $914$  °С та програма прорахувала додаткову арматуру. Це вказує на те, що існуючої арматури не достатньо для забезпечення вогнестійкості R180 при даних розрахункових зусиллях в колоні, тому максимальна площа армування в результаті перерахунку програмою підвищилась до  $58,7$  см<sup>2</sup> (в 10 разів більше від початкової).

4. Розроблено методику оцінювання вогнестійкості вогнезахисних будівельних конструкцій на основі розробленої математичної моделі та розрахунково-

експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій, що можуть бути використані для кожної індивідуальної будівлі чи будівельної конструкції.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Chernukha, A., Teslenko, A., Kovaliov, P., Bezuglov, O. Mathematical modeling of fire-proof efficiency of coatings based on silicate composition (2020) Materials Science Forum, 1006 MSF, pp. 70-75.
2. Yu. Otrosh, O. Semkiv, E. Rybka, A. Kovalov, About need of calculations for the steel framework building in temperature influences conditions. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 708 1 (2019) 1.
3. Otrosh Y., Kovalov A., Semkiv O., Rudeshko I., Diven V. Methodology remaining lifetime determination of the building structures. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 230, стаття № 02023.
4. Kovalov A., Otrosh Y., Vedula S., Danilin O., Kovalevska T. Parameters of fire-retardant coatings of steel constructions under the influence of climatic factors. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2019. Vol. 3. P. 46–53.
5. Kovalov A., Otrosh Y., Ostroverkh O., Hrushovinchuk O., Savchenko O. Fire resistance evaluation of reinforced concrete floors with fire-retardant coating by calculation and experimental method. E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 60, стаття № 00003.
6. Dubinin D., Korytchenko K., Lisnyak A., Hrytsyna I., Trigub V. Numerical simulation of the creation of a fire fighting barrier using an explosion of a combustible charge. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 6, No. 10–90. P. 11–16.
7. Kondratiev A. Improving the mass efficiency of a composite launch vehicle head fairing with a sandwich structure // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 6. No. 7 (102). – P. 6 – 18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184551>
8. Li, S., Jiaolei, Z., Zhao, D. and Deng, L. Study on fire resistance of a prefabricated reinforced concrete frame structure. Journal of Structural Fire Engineering. 2021. Vol. 12. № 3. P. 363–376. <https://doi.org/10.1108/JSFE-12-2020-0039>.
9. Hertz, K., Giuliani, L., & Sørensen, L. S. Fire resistance of extruded hollow-core slabs. Journal of Structural Fire Engineering. 2017. Vol. 8(3). P. 324–336. <https://doi.org/10.1108/JSFE-07-2016-0009>
10. Franssen, J. M., Gernay, T. Modeling structures in fire with SAFIR®: Theoretical background and capabilities. Journal of Structural Fire Engineering. 2017. Vol. 8(3). P. 300–323. <https://doi.org/10.1108/JSFE-07-2016-0010>
11. de Souza R. C. S., Andreini M., La Mendola S., Zehfuß J., Knaust C. Probabilistic thermo-mechanical finite element analysis for the fire resistance of reinforced concrete structures. Fire Safety Journal. 2019. 104. P. 22–33. URL: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.12.005>
12. Walls, R., Viljoen, C. and de Clercq, H. Parametric investigation into the cross-sectional stress-strain behaviour, stiffness and thermal forces of steel, concrete and composite beams exposed to fire. Journal of Structural Fire Engineering. 2020. Vol. 11. № 1. P. 100–117. <https://doi.org/10.1108/JSFE-10-2018-0031>.
13. Mwangi, S. Why Broadgate Phase 8 composite floor did not fail under fire : Numerical investigation using ANSYS® FEA code. Journal of Structural Fire Engineering. 2017. Vol. 8(3). P. 238–257. <https://doi.org/10.1108/JSFE-05-2017-0032>
14. Sasani M. Progressive collapse resistance of reinforced concrete structures. Blast Mitigation. Springer, New York, NY. 2014. P. 331–350. doi: 10.1007/978-1-4614-7267-4\_11

15. Sadkovyi V., Andronov V., Semkiv O., Kovalov A., Rybka E., Otrosh Yu. et. al. Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER. 2021. 180 p. <http://doi.org/10.15587/978-617-7319-43-5>

16. Отрош Ю.А., Ковальов А.І., Рашкевич Н.В., Тараненко І.С. Оцінювання вогнестійкості будівлі із вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій. Комунальне господарство міст, серія: технічні науки та архітектура. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. 2023. № 3(177). С.134–141.

17. Kovalov, A., Purdenko, R., Otrosh, Y., Tomenko, V., Rashkevich, N., Shcholokov, E., Pidhornyy, M., Zolotova, N., Suprun, O. (2022). Assessment of fire resistance of fireproof reinforced concrete structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (119)), 53–61.

18. Моделювання нестационарного прогріву вогнезахисних залізобетонних колон [Текст] /А.І. Ковальов, Р.Р.Пурденко, Ю.А. Отрош, В.І.Томенко, Н.В.Рашкевич, С.П. Юрченко // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – Київ: ІДУ та НДЦЗ, 2022. – № 2(14). – С.87–98.

## REFERENCES

1. Chernukha, A., Teslenko, A., Kovaliov, P., Bezuglov, O. Mathematical modeling of fire-proof efficiency of coatings based on silicate composition (2020) *Materials Science Forum*, 1006 MSF, pp. 70–75.

2. Yu. Otrosh, O. Semkiv, E. Rybka, A. Kovalov, About need of calculations for the steel framework building in temperature influences conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 708 1 (2019) 1.

3. Otrosh Y., Kovalov A., Semkiv O., Rudeshko I., Diven V. Methodology remaining lifetime determination of the building structures. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 230, статья № 02023.

4. Kovalov A., Otrosh Y., Vedula S., Danilin O., Kovalevska T. Parameters of fire-retardant coatings of steel constructions under the influence of climatic factors. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. Vol. 3. P. 46–53.

5. Kovalov A., Otrosh Y., Ostroverkh O., Hrushovinchuk O., Savchenko O. Fire resistance evaluation of reinforced concrete floors with fire-retardant coating by calculation and experimental method. *E3S Web of Conferences*. 2018. Vol. 60, статья № 00003.

6. Dubinin D., Korytchenko K., Lisnyak A., Hrytsyna I., Trigub V. Numerical simulation of the creation of a fire fighting barrier using an explosion of a combustible charge. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 6, No. 10–90. P. 11–16.

7. Kondratiev A. Improving the mass efficiency of a composite launch vehicle head fairing with a sandwich structure // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2019. – Vol. 6. No. 7 (102). – P. 6 – 18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184551>

8. Li, S., Jiaolei, Z., Zhao, D. and Deng, L. Study on fire resistance of a prefabricated reinforced concrete frame structure. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2021. Vol. 12. № 3. P. 363–376. <https://doi.org/10.1108/JSFE-12-2020-0039>.

9. Hertz, K., Giuliani, L., & Sørensen, L. S. Fire resistance of extruded hollow-core slabs. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2017. Vol. 8(3). P. 324–336. <https://doi.org/10.1108/JSFE-07-2016-0009>

10. Franssen, J. M., Gernay, T. Modeling structures in fire with SAFIR®: Theoretical background and capabilities. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2017. Vol. 8(3). P. 300–323. <https://doi.org/10.1108/JSFE-07-2016-0010>

11. de Souza R. C. S., Andreini M., La Mendola S., Zehfuß J., Knaust C. Probabilistic thermo-mechanical finite element analysis for the fire resistance of reinforced concrete



structures. *Fire Safety Journal*. 2019. 104. P. 22–33. URL: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.12.005>

12. Walls, R., Viljoen, C. and de Clercq, H. Parametric investigation into the cross-sectional stress-strain behaviour, stiffness and thermal forces of steel, concrete and composite beams exposed to fire. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2020. Vol. 11. № 1. P. 100–117. <https://doi.org/10.1108/JSFE-10-2018-0031>.

13. Mwangi, S. Why Broadgate Phase 8 composite floor did not fail under fire: Numerical investigation using ANSYS® FEA code. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2017. Vol. 8(3). P. 238–257. <https://doi.org/10.1108/JSFE-05-2017-0032>

14. Sasani M. Progressive collapse resistance of reinforced concrete structures. Blast Mitigation. Springer, New York, NY. 2014. P. 331–350. doi: 10.1007/978-1-4614-7267-4\_11

15. Sadkovyi V., Andronov V., Semkiv O., Kovalov A., Rybka E., Otrosh Yu. et. al. Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER. 2021. 180 p. <http://doi.org/10.15587/978-617-7319-43-5>

16. Otrosh Yu.A., Kovalov A.I., Rashkevich N.V., Taranenko I.S. Ocinyuvannya vognestijkosti budivli iz vognazahishenih zalizobetonnih budivelnih konstrukcij. Komunalne gospodarstvo mist, seriya: tehnicni nauki ta arhitektura. Harkiv: HNUMG im. O.M. Beketova. 2023. № 3(177). S.134-141.

17. Kovalov, A., Purdenko, R., Otrosh, Y., Tomenko, V., Rashkevich, N., Shcholokov, E., Pidhornyy, M., Zolotova, N., Suprun, O. (2022). Assessment of fire resistance of fireproof reinforced concrete structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (119)), 53–61.

18. Modelyuvannya nestacionarnogo progridu vognazahishenih zalizobetonnih kolon [Tekst] /A.I. Kovalov, R.R. Purdenko, Yu.A. Otrosh, V.I. Tomenko, N.V.Rashkevich, S.P. Yurchenko // *Naukovij visnik: Civilnij zahist ta pozhezhna bezpeka*. – Kiyiv: IDUtaNDCZ, 2022. – № 2(14). – S.87–98.

*Andrii KOVALOV<sup>1</sup>, PhD, Senior Researcher, Associate Professor,*

*Ivan TARANENKO<sup>2</sup>, Serhii YURCHENKO<sup>3</sup>,*

*Vitalii TOMENKO<sup>1</sup>, PhD, Associate Professor,*

*Oleksandr CHERNENKO<sup>1</sup>, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor,*

*<sup>1</sup>Cherkassy institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkassy, Ukraine*

*<sup>2</sup>National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

*<sup>3</sup>Cherkasy Scientific Research Forensic Centre of the Ministry of Internal Affairs in Ukraine, Cherkassy, Ukraine*

## **FIRE RESISTANCE ASSESSMENT METHOD OF BUILDINGS FROM FIRE-PROOF BUILDING STRUCTURES**

*An assessment of the fire resistance of the building made of building structures protected from fire by fire-resistant coatings was carried out. This technique is based on the use of a mathematical model and a calculation-experimental method to determine the fire resistance of reinforced concrete structures. A computer model was also created to analyze the thermal and stress-strain state of a building made of fire-resistant constructions (using the example of a three-story parking lot for cars).*

*The model takes into account the properties of fire-resistant coatings, thermophysical and mechanical characteristics of materials used in the structure, as well as nonlinear laws of deformation of materials at high temperatures and under the influence of force loads. The model allows you to determine the fire resistance class of building structures with the use of*

*fire-resistant coatings of various types. An analysis of fire variants was carried out to study the fire resistance (stability) of the building depending on the place of origin and fire load on the reinforced concrete structures of the car parking building.*

*Evaluation of the fire resistance of the fire-resistant building structure was carried out using the developed models. An assessment of the fire resistance of the building made of fire-resistant constructions was carried out. Measures to increase the fire resistance limits of structures, consisting in the use of fire-resistant coatings with scientifically based parameters, are proposed. The thickness of the passive fire-resistant coating, thermal conductivity coefficient, specific heat capacity, which must be set when evaluating the fire resistance of a fire-resistant reinforced concrete column and increasing the limits of fire resistance to 180 min, are substantiated. In numerical calculations of non-stationary heating of a fire-resistant reinforced concrete column of a parking lot (coating thickness 11 mm) under conditions of exposure to a standard fire for 180 min. it was established that the temperature on the reinforcing rods reached 213 °C, which is 4 times less than the heating of an unprotected column.*

**Key words:** *fire-resistant reinforced concrete structures, fire resistance assessment, numerical modeling, fire protection, LIRA-SAPR.*