

DOI: 10.32347/2522-4182.12.2023.53-64  
УДК 614.841.332

## РОЗРАХУНКОВЕ ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗАСОБАМИ ПК «ЛІРА-САПР»

Марія БАРАБАШ<sup>1,2</sup>, Андрій КОВАЛЬОВ<sup>3</sup>, Марина РОМАШКІНА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний авіаційний університет,  
проспект Любомира Гузара, 1, Київ, 03058

<sup>2</sup>ТОВ «ЛІРА САПР»,  
провулок Киянівський, 7-а, Київ, Україна, 04053

<sup>3</sup>Національного університету цивільного захисту України,  
вул. Чернишевська, 94, м. Харків, 61023

<sup>1</sup>[bmari.lira@gmail.com](mailto:bmari.lira@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-2157-521X>

<sup>2</sup>[kovalev27051980@gmail.com](mailto:kovalev27051980@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-6525-7558>

<sup>3</sup>[romashkina.liraland@gmail.com](mailto:romashkina.liraland@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-7158-4037>

**Анотація.** Запропоновано методику чисельного дослідження напружено деформованого стану вогнезахищеної залізобетонної конструкції з урахуванням нестаціонарних полів температур в бетоні та арматурі для стандартного температурного режиму пожежі за допомогою системи «Теплопровідність» ПК «ЛІРА-САПР».

Описано скінчено-елементні моделі для оцінки ефективності вогнезахисту будівельних конструкцій, а також для визначення дійсної межі вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій.

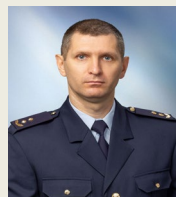
Методика ілюструється на прикладі розрахунку на вогнестійкість вогнезахищеної багатопустотної залізобетонної плити. В статті пропонуються скінченно-елементні моделі вогнезахищених будівельних конструкцій із застосуванням вогнезахисних покриттів різних типів. Визначається розподіл температур у вузлах розрахункових моделей та проводиться оцінювання їх вогнестійкості. Виконується коригування фізико-механічних характеристик матеріалів на основі отриманих температурних полів та перевірка несної здатності конструкції на дію силових та температурних навантажень.

Отримано розподіл температур у скінченно-елементній моделі вогнезахищеного залізобетонного перекриття на 120 та на 240 хвилини випробування за стандартним температурним режимом пожежі.

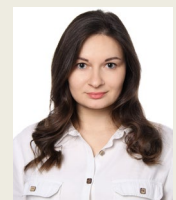
© М. БАРАБАШ, А. КОВАЛЬОВ, М. РОМАШКІНА, 2023



**Марія БАРАБАШ**  
професор кафедри комп'ютерних технологій будівництва та реконструкції аеропортів,  
д.т.н, професор.  
Директор ТОВ «ЛІРА САПР»



**Андрій КОВАЛЬОВ**  
старший науковий співробітник,  
к.т.н, докторант,



**Марина РОМАШКІНА**  
провідний інженер  
ТОВ «ЛІРА-САПР»,  
к.т.н

Результати чисельного моделювання нестаціонарного прогріву вогнезахищеного залізобетонного перекриття в програмі «ЛІРА-САПР» було порівняно з експериментальними випробуваннями у вогневій печі. Отримано задовільну збіжність експериментальних та розрахункових значень.

Застосування запропонованої методики забезпечує можливість провести досить точну оцінку вогнестійкості залізобетонних конструкцій та прогнозувати їх напружено-деформований стан під час пожежі.

**Ключові слова.** Скінченно-елементні моделі; чисельне моделювання; ПК ЛІРА-САПР; розподіл температур; нелінійна теплопровідність; стаціонарна теплопровідність; повзучість бетону; вогнестійкість; вогнезахист.

## ВСТУП

При проектуванні житлових будівель, споруд та не виробничих приміщень часто не передбачаються додаткові заходи щодо забезпечення вогнестійкості від впливу пожежі всередині приміщення. Зазвичай під час проектування будівлі розрахунок вогнестійкості взагалі не проводився.

Слід зазначити, що у зв'язку з військовим станом дуже часто виникають обвалення несних конструкцій з подальшим руйнуванням частини або цілої будівлі внаслідок виникнення пожежі всередині приміщення після влучання ракети. Наслідком таких подій є значні матеріальні збитки та загроза життю та безпеці людей.

Проблемі вогнестійкості залізобетонних конструкцій присвячено значну кількість наукових досліджень. Роботи Б.Г. Демчіни [1], С.Ф. Клованіча [2], М.Й. Колякова [1], А.Ф. Мілованова [3], В.М. Ройтмана [4], С.Л. Фоміна [5], А.І. Яковлева [6], Bazant Z. P [7-10], J. Franssenc, T. Gernay [11], V.K.R. Kodur [12-16], В.М. Колякової [23,24] є важливими внесками у цю галузь. Ці автори проводили дослідження, присвячені поведінці залізобетону при високих температурах, ефективності вогнезахисних покриттів, впливу хімічних реакцій під час пожежі, а також аналіз різних факторів, які впливають на вогнестійкість залізобетонних елементів.

В [17] розглядається проблема дослідження поведінки багатопустотних залізобетонних перекриттів при впливі високих температур і використовує числові методи та моделі для аналізу їх теплових характеристик. Але запропонована методика розраху-

нку плити перекриття не враховує взаємодію між характерними ділянками бетону, оскільки плита перекриття модульована плоскими скінченними елементами. У [18] наведено порівняння запропонованих у нормативних документах методів аналізу вогнестійкості. Але немає порівняння розрахунків реальних конструкцій за різними нормативними документами.

Отже, можна зробити висновок, що процес моделювання плит перекриття з урахуванням дії високих температур досліджений недостатньо. А існуюча нормативна документація [19] не дає нам методики розрахунку та проектування будівель та споруд з урахуванням виникнення можливої пожежі, яка може спричинити прогресуюче обвалення.

Тому метою статті є розробка методу розрахунку напружено деформованого стану вогнезахисної залізобетонної конструкції з урахуванням нестационарних полів температур в бетоні та арматурі для стандартного температурного режиму пожежі за допомогою ПК «ЛІРА-САПР» (Україна). Що дає можливість оцінювати вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів.

## ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для оцінки вогнестійкості вогнезахисних будівельних конструкцій необхідно виконати чисельне моделювання конструкцій з врахуванням вогнезахисних покриттів і оцінити їх напружено-деформований стан, в тому числі визначити розподіл температур по перерізу будівельної конструкції і перевірити несну здатність із зміненими жорсткісними характеристиками від впливу на конструкцію підвищених температур. Оцінити точність розроблених скінченно-елементних моделей дає змогу експеримент.

## ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Для вирішення задач теплопровідності використовуються аналітичні та числові методи. Аналітичні методи полягають у знаходженні розв'язку шляхом підбору функцій,

які задовольняють диференціаль-ному рівнянню теплопровідності та крайовим умовам. До найпоширеніших аналітичних методів належать методи інтегральних перетворень, такі як перетворення Ханкеля, Лапласа та Фур'є, а також метод джерел.

На сьогоднішній день найбільш поширеним чисельним методом для розв'язання задач теплопровідності є метод скінченних елементів (МСЕ або FEM). Цей метод дозволяє проводити обчислення, використовуючи

$$K_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + w = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

де  $T = T(x, y, z, t)$  – поле температур в області  $\Omega$ ;

$K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$  – коефіцієнти теплопровідності в напрямку  $x, y, z$  відповідно;  $w = w(x, y, z, t)$  – потужність теплоджерел всередині тіла;

$\rho$  – щільність матеріалу;  $c$  – питома теплоємність матеріалу

Розв'язати дане рівняння можна методом скінченних елементів або методом скінченних різниць. При використанні першого методу, конструкцію моделюють за допомогою спеціальних скінченних елементів (СЕ) з одним ступенем вільності, що представляє собою температуру як скалярну величину [20].

Для задач теплопередачі в ПК «ЛІРА-САПР» в системі «Теплопровідність» використовуються одномірні, плоскі і просторові СЕ теплопровідності.

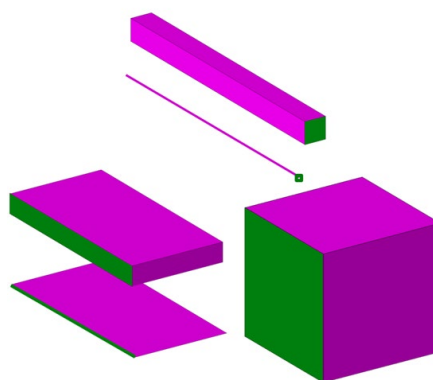
Для моделювання контакту поверхні з середовищем служать спеціальні скінченні елементи конвективної тепловіддачі.

математичну модель, яка включає реальні дані про геометричні характеристики, властивості матеріалів та граничні умови. В результаті чисельного аналізу отримується повна і детальна інформація про поля температур у системі.

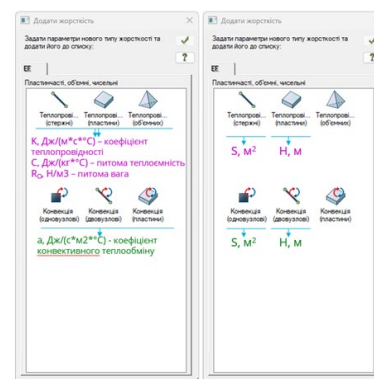
У формулі (1) наведено рівняння крайової задачі для нестационарної теплопровідності:

Елементом теплопровідності задаються теплофізичні властивості матеріалів (коефіцієнт теплопровідності, питома теплоємність, питома вага). Для елементів конвекції – визначається коефіцієнт конвективного теплообміну.

Теплопередача в стержневому елементі здійснюється вздовж стержня, тому на торці стержня необхідно встановити одновузловий СЕ у разі моделювання конвективного теплообміну. І вказати площу контакту. Аналогічно для пластин – накладається елементи конвекції на ребра пластин, а для об'ємних СЕ – на грань (рис.1).



а



б

**Рис.1.** Скінченні елементи теплопровідності та конвекції

**Fig.1.** Finite elements of heat conductivity and convection

Реалізація в ПК «ЛІРА-САПР» скінченних елементів теплопровідності та конвек-

ції, дало змогу розробити систему «Вогнестійкість». Ця система дозволяє виконати

теплотехнічний розрахунок для визначення характеру прогріву перерізу і визначення температури в шуканих точках поперечного перерізу конструкції для забезпечення необхідної межі вогнестійкості по теплоізолюючій здатності. А також, виконати автоматизований підбір армування для забезпечення необхідної межі вогнестійкості залізобетонних та сталезалізобетонних конструкцій по втраті несної здатності згідно з нормами ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 [19]. Розрахунок межі вогнестійкості залізобетонних та сталезалізобетонних конструкцій в ПК «ЛІРА-САПР» зводиться до обчислення розподілу температур по перерізу відповідно до заданого періоду часу в умовах пожежі; подальшим коригуванням фізико-механічних характеристик матеріалів на основі отриманих температурних полів; перевірки несної здатності елементів конструкції на дію нормативного навантаження і у разі невиконання вимог – нарощування армування.

Розрахунок вогнестійкості реалізований для стандартних типів перерізів (це прямокутник, кільце, тавр, тавр несиметричний, двотавр, хрест, куточок), сталезалізобетонних (це прямокутний бетонний переріз з різними варіантами розташування жорсткої арматури та різні трубобетонні перерізи) та пластин. Після завдання вихідних даних для вибраного перерізу визначаються температурні поля та характеристики матеріалів бетону та арматури при вогневому впливі. Що дає змогу, ще до виконання розрахунку схеми визначити теплоізолюючу здатність конструкцій і оцінити чи досягли бетон або арматура критичної температури прогріву. Проте, на сьогодні в будівництві використовується безліч вогнезахисних покриттів, які надають додатковий шар захисту від впливу високих температур та вогню, та збільшують огнестійкість конструкцій та будівель в цілому. В системі «Вогнестійкість» не передбачено можливості параметричного завдання вогнезахисного покриття. Тому для нестандартних перерізів і для вогнезахисних конструкцій пропонується наступна методика моделювання розрахункової схеми.

## ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ БАГАТОПУСТОТНОЇ ПЛИТИ ВІД ДІЇ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР З НАНЕСЕННЯМ ВОГНЕЗАХСНОГО ШАРУ

### **Вихідні дані та результати розрахунку.**

Вирішення даної задачі можна поділити на два етапи. На першому етапі виконується чисельне моделювання теплового стану залізобетонної плити перекриття із застосуванням вогнезахисного покриття та одержання полів розподілу температур в бетоні та арматурі в умовах пожежі.

На другому етапі виконується коригування фізико-механічних характеристик матеріалів на основі отриманих температурних полів. Закони нелінійного деформування основного та армуючого матеріалів задаються з урахуванням зміни фізико-механічних властивостей бетону та арматури при високотемпературному вогневому впливі. Базові точки діаграм визначаються з урахуванням середньої температури бетону в кожній окремій ділянці перерізу плити, згідно з теплотехнічним розрахунком у системі «Теплопровідність» та параметрами взятими з ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2 [19]. Далі виконується статичний розрахунок на вплив силових та температурних навантажень, після якого можна виконати аналіз напружено-деформованого стану багатопорожнистої залізобетонної плити перекриття.

### **Етап № 1.**

#### **Побудова скінчено-елементної моделі вогнезахисного багатопустотного залізобетонного перекриття.**

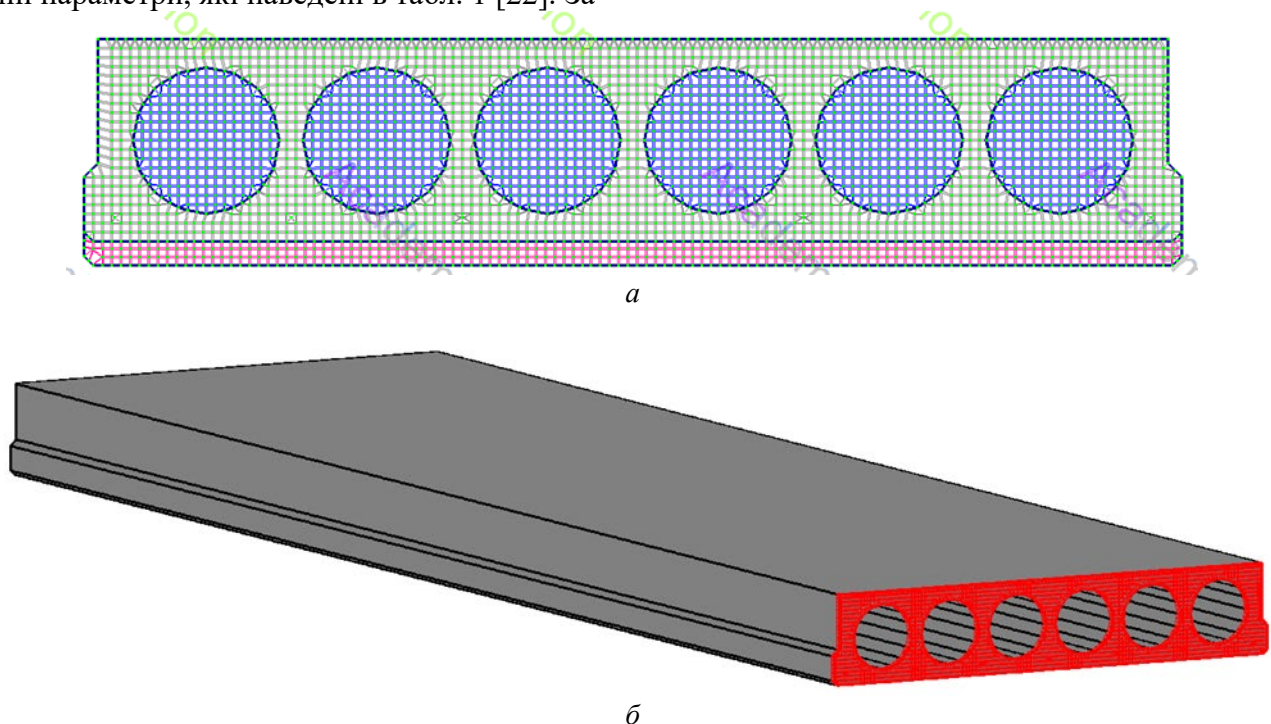
При побудові скінчено-елементної моделі вогнезахисного багатопустотного залізобетонного перекриття координатна сітка накладається так, щоб її вузли розташовувалися не тільки в товщині перерізу, але і по його периметру. Також вузли розміщуються у центрі арматурних стержнів.

Було змодельовано поперечний переріз багатопустотного залізобетонного перек-

риття (для того щоб виконати моделювання в системі «Теплопровідність» потрібно обрати п'ятнадцяту ознаку схеми).

Змодельованим елементам скінчено-елементної моделі було призначено теплофізичні параметри, які наведені в табл. 1 [22]. За

допомогою скінченних елементів теплопровідності на поверхні багатопорожнистої плити моделюється теплозахисний екран з відповідними теплофізичними властивостями матеріалу (рис. 2).



**Рис. 2.** Модель залізобетонного перекриття  
*a* – поперечний переріз багатопустотного залізобетонного перекриття;  
*б* – вогнезахищене залізобетонне перекриття 3-D

**Fig. 2.** Model of a reinforced concrete slab  
*a* - cross-section of the fireproof reinforced concrete slab;  
*b* – fireproof reinforced concrete slab 3-D

## Етап № 2.

### Оцінювання вогнестійкості вогнезахищеного багатопустотного залізобетонного перекриття за допомогою розроблених моделей.

#### *а) моделювання нестационарного прогріву вогнезахищеного багатопустотного залізобетонного перекриття.*

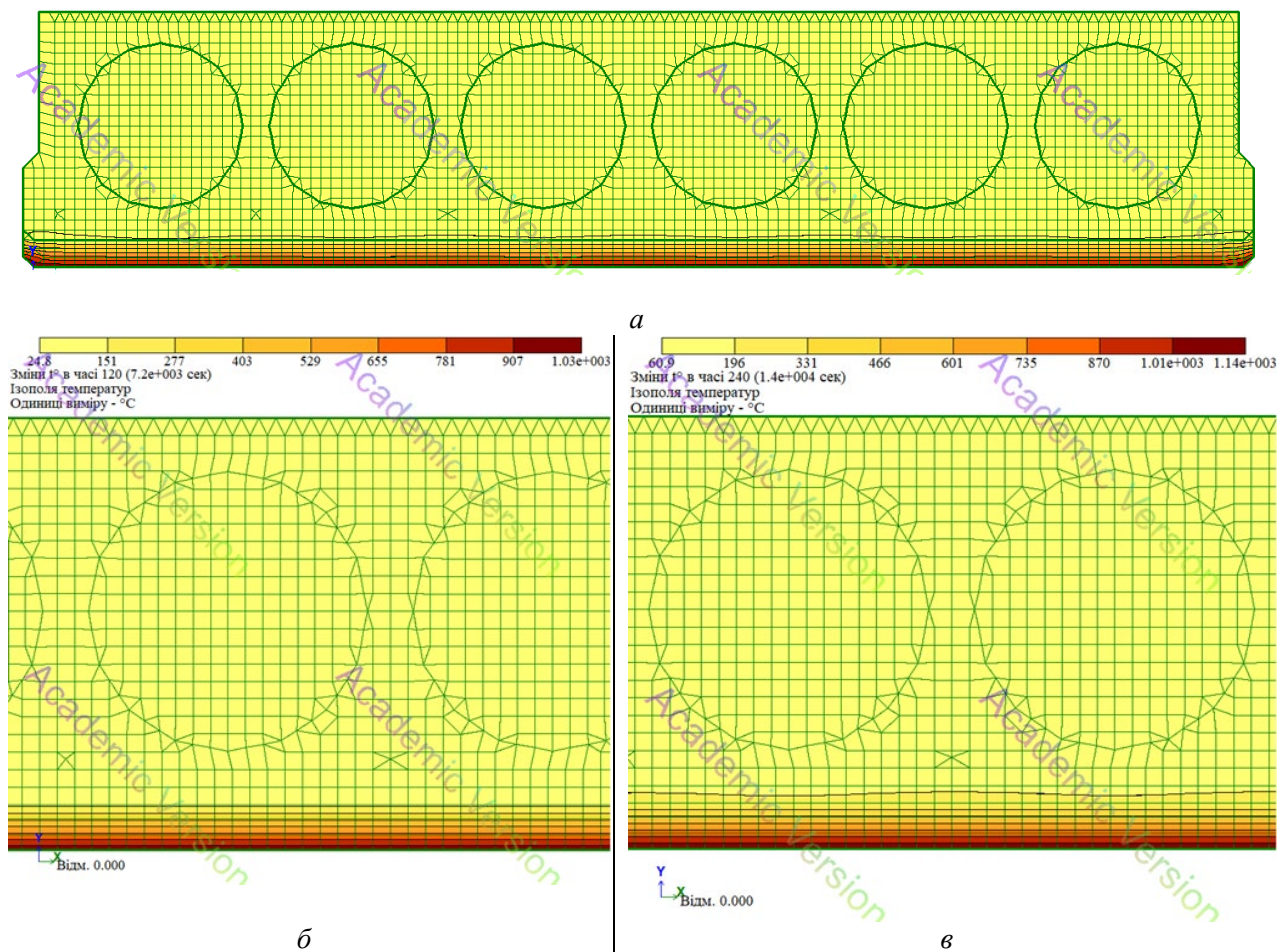
Для розрахунків нерівномірних розподілів температури в поперечному перерізі вогнезахищеного залізобетонного перекриття було застосовано математичну модель нестационарної теплопровідності, математичний апарат якої використано в програмі «ЛІРА-САПР» [20, 22]. Модель являє собою диференційне рівняння теплопровідності,

яка враховує радіаційно-конвективний теплообмін від газового середовища до вогнезахищеної поверхні перекриття, яка обігрівается (граничні умови III-го роду), теплообмін теплопровідністю в перекритті і радіаційно-конвективний- теплообмін з боку поверхні перекриття, яка не обігрівается (граничні умови III-го роду).

Розв'язання задачі нестационарної теплопровідності зводиться до моделювання динамічних процесів теплообміну і отримання розподілу температур у будь-якій точці в будь-який момент часу вогнезахищеного залізобетонного перекриття.

В результаті розрахунку скінченно-елементної моделі були отримані розподіли температур у вогнезахищеному багатопорожнестому перекритті на 120 та 240 хвилинах

вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі (рис. 3).



**Рис. 3.** Розподіл температур у фрагменті вогнезахищеного залізобетонного перекриття:

*a* – скінченно-елементна модель вогнезахищеного залізобетонного перекриття;

*б* – на 120 хвилині випробування; *в*) на 240 хвилині випробування

**Fig. 3.** Temperature distribution in a fragment of a fireproof reinforced concrete slab:

*a* – finite-elements model of fireproof reinforced concrete slab;

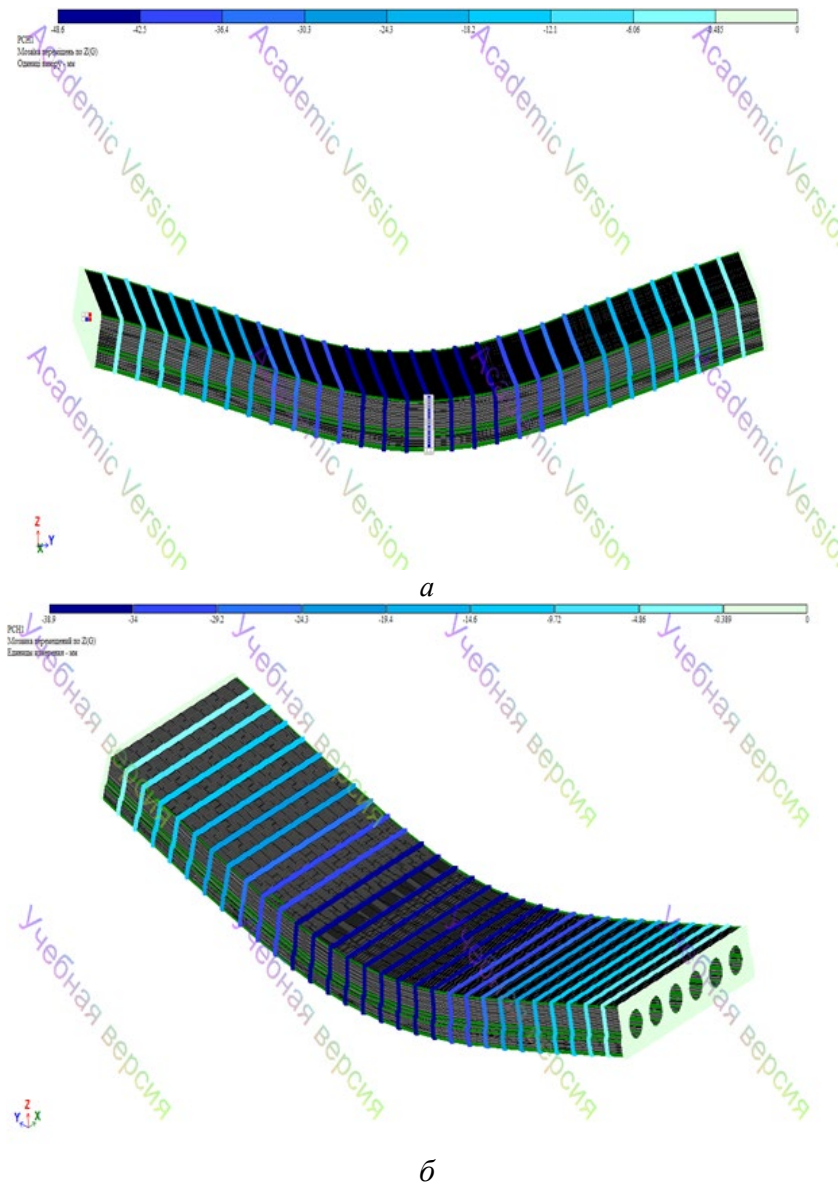
*б*- at the 120 minutes of testing; *в*) at the 240 minutes of testing

**б) моделювання напружено-деформованого стану вогнезахищеного багатопорожнистого залізобетонного перекриття.**

Виконується статичний розрахунок на вплив силових та температурних навантажень. Розрахунок проводився із врахуванням фізичної нелінійності матеріалів. Для врахування нелінійності в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» був обраний простий кроковий метод з кількістю кроків - 30. Для виконання нелінійного розрахунку, з урахуванням статичного закону повзучості,

з урахуванням фактору часу, попередньо обчислюється коефіцієнт повзучості  $\varphi_0$  і коефіцієнт  $\beta_n$ , які залежать від відносної вологості ( $R_n$ , %) і умовного розміру перерізу ( $h_0$ , мм). В програмному комплексі «ЛІРА-САПР» застосовано експоненціальний закон нелінійного деформування бетону та кусково-лінійний закон нелінійного деформування арматурних включень.

Значення найбільш істотних параметрів, залежних від температури приведені у статті [21]. На рис. 4 зображено результати статичного розрахунку в програмному комплексі «ЛІРА-САПР».



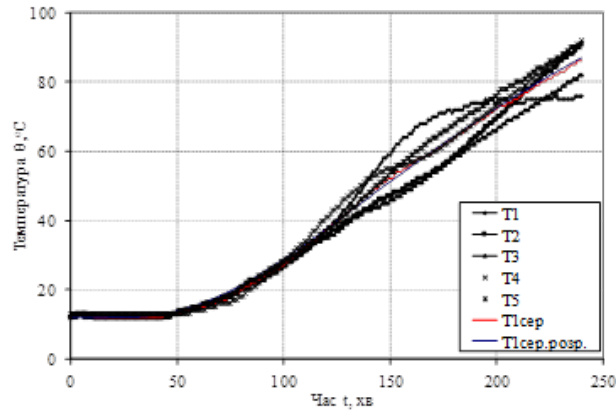
**Рис. 4.** Величини прогинів багатопустотної плити перекриття, яка досліджувалась  
**Fig. 4.** Displacements of the reinforced concrete slab

### Етап № 3.

#### Оцінка точності розроблених скінчено-елементних моделей вогнезахищеного багатопорожнистого залізобетонного перекриття.

Результати чисельного моделювання не-  
стаціонарного прогріву вогнезахищеного за-  
лізобетонного перекриття в програмі

«ЛІРА-САПР» було порівняно з експеримен-  
тальними випробуваннями у вогневій печі.  
Дані, представлені на рис. 5, а саме темпера-  
тури з необігрівної поверхні вогнезахище-  
ного залізобетонного перекриття, співпада-  
ють з результатами експерименту.

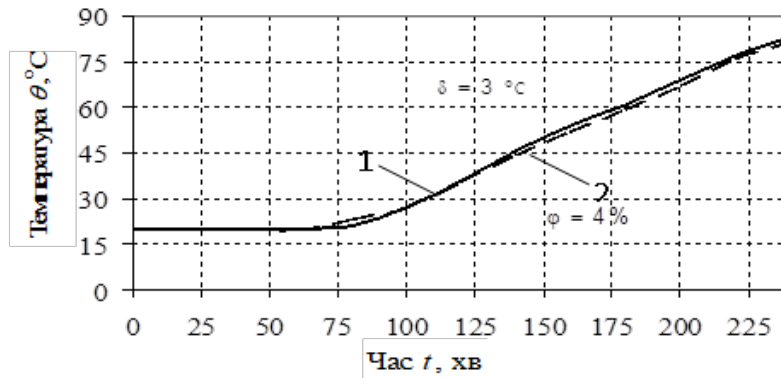


**Рис. 5.** Залежність температури з не обігрівної поверхні вогнезахищеного залізобетонного перекриття від часу вогневого впливу:  
 T1–T5 – температури в геометричних центрах чвертей залізобетонного перекриття, отримані експериментально; T1сер. – експериментальна середня температура; T1сер.розн. – середня температура, отримана в результаті чисельного моделювання.

**Fig. 5.** Dependence of the temperature on the unheated surface of a fireproof reinforced concrete slab on the time of fire exposure:  
 T1-T5 - temperatures in the geometric centers of the quarters of the reinforced concrete slab obtained experimentally; T1av. is the experimental average temperature; T1av.op - the average temperature obtained because of numerical modeling.

Це підтверджують дані, представлені на рис. 6, де показані температури з не обігрівної поверхні вогнезахищеного залізобетон-

ного перекриття, отримані експериментально та в результаті чисельного моделювання.



**Рис. 6.** Температура з необігрівної поверхні вогнезахищеного залізобетонного перекриття:  
 1 – експериментальна крива;  
 2 – розрахункова крива».

**Fig. 6.** Temperature from the unheated surface of a fireproof reinforced concrete floor:  
 1 - experimental curve;  
 2 - calculated curve.

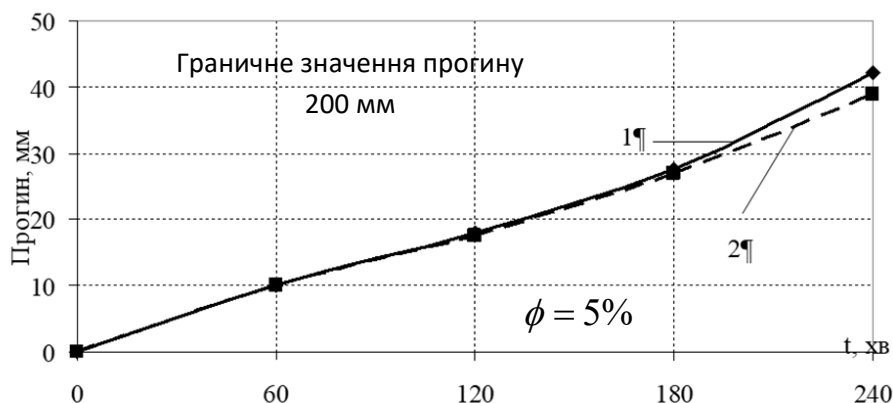
Найбільше відхилення температури від експериментальних значень спостерігалось на 160–180 хвилини розрахунку і становило  $3 ^\circ\text{C}$ , що відповідає похибці не більше 4 %. Це свідчить про коректність моделювання теплових процесів в системі «залізо-

бетонне перекриття – вогнезахисне покриття» та є верифікацією реалізованих методів моделювання стаціонарних і нестаціонарних процесів теплообміну в ПК «ЛІРА-САПР». Підтвердженням адекватності розробленої комп’ютерної моделі при моделюванні напружено-деформованого стану є



графіки (рис. 7) [21], з яких видно задовільну збіжність експериментальних та розрахункових значень прогину залізобетонного вогнезахисного перекриття по середині

прольоту при умові впливу стандартного температурного режиму пожежі.



**Рис. 7.** Графіки переміщень в контрольній точці в середині прольоту при стандартному температурному режимі пожежі: 1 – експеримент; 2 – розрахунок в програмному комплексі «ЛІРА-САПР»

**Fig. 7.** Displacements of the control point in the middle of a span of a reinforced concrete fireproof slab during a standard fire temperature: 1 - experiment; 2 - calculation in the LIRA-SAPR software package

Як видно із рис. 7 прогин залізобетонного перекриття в середній частині плити складає 39,8 мм, що задовільно корелює з експериментальними результатами (42 мм), а похибка не перевищує 5 %.

В результаті досліджень було проведено ряд верифікаційних тестів стосовно роботи модуля «Теплопровідність» ПК Л«ЛІРА-САПР», обґрунтована доцільність проведення досліджень вогнестійкості за допомогою цієї програми.

## ВИСНОВКИ

У статті показано технологію моделювання оцінки вогнестійкості конструкцій з використанням ПК «ЛІРА-САПР».

Проведено експериментальне дослідження напружено-деформованого стану вогнезахисних залізобетонних конструкцій. Здійснено порівняння отриманих результатів. Отримано задовільну збіжність експериментальних та розрахункових значень. Прогин залізобетонного перекриття в середній частині плити складає 39,8 мм, що задовільно корелює з експериментальними

результатами (42 мм), а похибка не перевищує 5 % при умові впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Наведено методику розрахунку, яка дозволяє отримати розподіл температури по перерізу конструкції. Реалізована нелінійну теплопровідність для стержневих, пластинчастих та об'ємних СЕ дозволяє створювати закони зміни коефіцієнта теплопровідності та враховувати зміну фізичних характеристик бетону та арматури в залежності від температури прогріву перерізу.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Демчина Б. Г. До питання розрахунку вогнетривкості залізобетонних конструкцій. / Демчина Б. Г., Коляков М. Й. // *Збірник тез першої всеукраїнської науковотехнічної конференції "Науковопрактичні проблеми сучасного залізобетону"*. Київ.: 1996. С. 99 – 101.
2. Клованич С.Ф. Модель деформирования железобетона и расчет конструкций при сложном напряженном состоянии и нагреве: дис. д-ра техн. наук. 05.23.01. Москва, 1990. 404 с.

3. **Милованов А.Ф.** Работа железобетонных конструкций при высоких температурах. М., Стройиздат, 1972. 160 с.
4. **Ройтман М.Я.** Противопожарное нормирование в строительстве. М.: Стройиздат, 1985. 590 с.
5. **Фомин С. Л.** Методика расчета огнестойкости монолитных зданий с безригельными каркасами. Міжвідомчий наук.-техн. зб. наук. праць (будівництво). / Фомин С. Л. // *Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Міністерства регіонального розвитку та будівництва України. Вип. 74: в 2-х кн.: Книга 1. К.: ДП НДІБК, 2011. С. 228 – 239.*
6. **Яковлев А. И.** Расчет огнестойкости строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1988. 143 с.
7. **Bazant Z. P.** Concrete creep at variable humidity: constitutive law and mechanism / Z. P. Bazant, J. C. Chern // *Materiaux et constructions. – Vol. 18, № 103 – 1985. – P. 1 – 20.*
8. **Bazant Z. P.** Mathematical model for creep and thermal shrinkage of concrete at high temperature / Z. P. Bazant // *Nuclear engineering and Design. – 1982. – P. 183 – 191.*
9. **Bazant Z. P.** Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete / Z. P. Bazant // *John Wiley & Sons Ltd. Chapter 2. – Material Models for Structural Analysis. – 1988. – P. 98 – 215.*
10. **Bazant Z. P.** Temperature effect on Concrete Creep Modeled by Microprestress-Solidification Theory / Zdenek Bazant, Gianluca Cusatis, Luigi Cedolin // *Journal of engineering mechanics. – 2004. – P. 691 – 699.*
11. **Gernaya T.** A multiaxial constitutive model for concrete in the fire situation / Thomas Gernaya, Alain Millardb and Jean-Marc Franssenc // *Theoretical formulation. International Journal of Solids and Structures. V 50, I. 22–23, 2013, p. 3659-3673.*
12. **Kodur, V.K.R.** An approach for evaluating residual capacity of reinforced concrete beams exposed to fire Engineering Structures. / Kodur, V.K.R., Agrawal, A // *J. of Engineering Structures, V. 110, 2016. p. 293 – 306*
13. **Rasoolinejad, M.** Correction to: Statistical filtering of useful concrete creep data from imperfect laboratory tests / Rasoolinejad, M., Rahimi-Aghdam, S., & Bazant, Z.P. // *Materials and Structures. Materiaux et Constructions . 2018. №. 51 (6).*
14. **Hubler M.** Statistical justification of model B4 for drying and autogenous shrinkage of concrete and comparisons to other models / Hubler M., Wendner R., Bažant Z. // *Mater Structures. 2015. №. 48(4). Pp. 797–814.*
15. **Wendner R.** Optimization method, choice of form and uncertainty quantification of model B4 using laboratory and multi-decade bridge databases / Wendner R., Hubler M., Bažant Z. // *Mater Structures. 2015. №. 48(4). Pp. 771–796.*
16. **Wendner R.** Statistical justification of model B4 for multi-decade concrete creep using laboratory and bridge databases and comparisons to other models / Wendner R., Hubler M., Bažant Z // *Mater Structures. 2015. №. 48(4) . Pp. 815–833.*
17. **Круковский П.** Моделирование теплового состояния и огнестойкости многопустотного железобетонного перекрытия. (2018). / Круковский П., Ковалев А., Черненко К., Метель М., Абрамов А. // *Пожежна безпека. 2012. Зб. №21. сс. 85-94.*
18. **Фомин С. Л.** Расчет огнестойкости железобетонных плит перекрытия по уточненным и упрощенным методам / С. Л. Фомин, И. А. Плахотникова, А. А. Парафенко // *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. - 2016. - Вип. 161. - С. 145-157.*
19. **ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012** Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1992-1-2:2004, IDT). [Чинний від 2013-07-01]. Вид. офіц. Київ
20. **Barabash M.S.** Thermal stress state of reinforced concrete floor slab / M.S. Barabash, M.A. Romashkina, O.U. Bashynska // *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2019. – Issue 103 . – P. 43-56.*
21. **Отрош Ю. А.** Вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій для підвищення рівня пожежної безпеки об'єктів/ Отрош Ю. А., Ковальов А. І., Пурденко Р. Р., Рашкевич Н. В., Майборода Р. І. // *Проблеми надзвичайних ситуацій. – 2022. – Вип. 36. – С. 102-122.*
22. **Bilyk S.** Determination of changes in thermal stress state of steel beams in LIRA-SAPR software. /Bilyk S., Bashynska O., Bashynskyi O. // *Strength of materials and theory of structures. 2022. Issue. 108. pp.189-202.*
23. **Колякова В.М.; Божинський, М. О.** Порівняльний аналіз теплотехнічних розрахунків з даними отриманими при натурному випробуванні. // *Містобудування та територіальне*

планування, Київ: КНУБА.- 2016, Вип 61: 288-296 с.

24. **Колякова В.М.; Божинський, М. О.** Дослідження напружено-деформованого стану залізобетонних колон при дії температурних впливів за допомогою ПК ЛІРА 9.6. // *Комунальне господарство міст*, 2009, 109: 27-32.

## REFERENCES

1. **Demchyna B.H.** Do pytannia rozrakhunku vohnetryvosti zalizobetonnykh konstruktsii. / Demchyna B. H., Koliakov M. Yo. // *Zbirnyk tez pershoi vseukrainskoi naukovotekhnichnoi konferentsii "Naukovopraktychni problemy suchasnoho zalizobetonu"* Kyiv.: 1996. S. 99 – 101
2. **Klovanych S.F.** Model deformatsiy zhelezobetonu y raschet konstruktsiy pry slozhnom napriazhenom sostoianny y nahreve: *dys. d-ra tekhn. nauk. 05.23.01., 1990. 404 s.*
3. **Mylovannov A.F.** (1972) Rabota zhelezobetonnykh konstruktsiy pry vysokikh temperaturakh. M., Stroyizdat. 160 s.
4. **Roitman M.Ia.** (1985) Protyvopozharnoe normyrovanye v stroytelstve. M. :Stroyizdat. 590 s.
5. **Fomyn S. L.** (2011) Metodyka rascheta ohnestoikosty monolytnykh zdanyi s bezryhelnyu karkasamy. Mizhvidomchyi nauk.-tekhn. // *zb. nauk. prats (budivnytstvo) / Derzhavne pidpriemstvo «Derzhavnyi naukovodoslidnyi instytut budivelnykh konstruktsii» Ministerstva rehionalnoho rozvytku ta budivnytstva Ukrainy. Vyp.74: v 2-kh kn.: Knyha 1. – K.: DP NDIBK. S. 228-239*
6. **Bazant Z. P.** Concrete creep at variable humidity: constitutive law and mechanism / Z. P. Bazant, J. C. Chern // *Materiaux et constructions. – Vol. 18, № 103 – 1985. – P. 1 – 20.*
7. **Bazant Z. P.** Mathematical model for creep and thermal shrinkage of concrete at high temperature / Z. P. Bazant // *Nuclear engineering and Design. – 1982. – P. 183 – 191.*
8. **Bazant Z. P.** Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete / Z. P. Bazant // *John Wiley & Sons Ltd. Chapter 2. – Material Models for Structural Analysis. – 1988. – P. 98 – 215.*
9. **Bazant Z. P.** Temperature effect on Concrete Creep Modeled by Microprestress-Solidification Theory / Zdenek Bazant, Gianluca Cusatis, Luigi Cedolin // *Journal of engineering mechanics. – 2004. – P. 691 – 699.*
10. **Gernaya T.** A multiaxial constitutive model for concrete in the fire situation / Thomas Gernaya, Alain Millardb and Jean-Marc Franssenc // *Theoretical formulation. International Journal of Solids and Structures. V 50, I. 22–23, 2013, p. 3659-3673.*
11. **Kodur, V.K.R.** An approach for evaluating residual capacity of reinforced concrete beams exposed to fire Engineering Structures. / Kodur, V.K.R., Agrawal, A // *J. of Engineering Structures, V. 110, 2016. p. 293 – 306*
12. **Rasoolinejad, M.** Correction to: Statistical filtering of useful concrete creep data from imperfect laboratory tests / Rasoolinejad, M., Rahimi-Aghdam, S., & Bazant, Z.P. // *Materials and Structures. Materiaux et Constructions . 2018. №. 51 (6).*
13. **Hubler M.** Statistical justification of model B4 for drying and autogenous shrinkage of concrete and comparisons to other models / Hubler M., Wendner R., Bazant Z. // *Mater Structures. 2015. №. 48(4). Pp. 797–814.*
14. **Wendner R.** Optimization method, choice of form and uncertainty quantification of model B4 using laboratory and multi-decade bridge databases / Wendner R., Hubler M., Bazant Z. // *Mater Structures. 2015. №. 48(4). Pp. 771–796.*
15. **Wendner R.** Statistical justification of model B4 for multi-decade concrete creep using laboratory and bridge databases and comparisons to other models / Wendner R., Hubler M., Bazant Z // *Mater Structures. 2015. №. 48(4) . Pp. 815–833.*
16. **Wendner R.** Statistical justification of model B4 for multi-decade concrete creep using laboratory and bridge databases and comparisons to other models / Wendner R., Hubler M., Bazant Z // *Mater Structures. 2015. №. 48(4) . Pp. 815–833.*
17. **Krukovskiy P.** Modelyrovanye teplovoho sostoianiya y ohnestoikosty mnohopustotnoho zhelezobetonnoho perekrytiya. (2018). / Krukovskiy P., Kovalev A., Chernenko K., Metel M., Abramov A. // *Pozhezhna bezpeka. 2012. Issue. №21. pp. 85-94*
18. **Fomin S.L.** Raschet ognestoykosti zhelezobetonnykh plit perekrytiya po utochnennym i uproshchennym metodam / S. L. Fomin, I. A. Plahotnikova, A. A. Parafenko // *Zbirnik naukovykh prats UkrDUZT. 2016. №. 161. Pp. 145–157.*
19. **DSTU-N B EN 1992-1-2:2012** Yevrokod 2. Proektuvannya zalizobetonnykh konstruktsii. Chastyna 1-2. Zahalni polozhennia. Rozrakhunok konstruktsii na vohnestoiikist (EN 1992-1-2:2004, IDT). [Chynnyi vid 2013-07-01]. Vyd. ofits. Kyiv

20. **Barabash M.S.** Thermal stress state of reinforced concrete floor slab / M.S. Barabash, M.A. Romashkina, O.U. Bashynska // *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2019. – Issue 103. – P. 43-56.*
21. **Otrosh Yu. A.** Vognestijkist vognazahishenih zalizobetonnih konstrukcij dlya pidvishennya rivnya pozhezhnoyi bezpeki ob'yektiv/ Otrosh Yu. A., Kovalov A. I., Purdenko R. R., Rashkevich N. V., Majboroda R. I. // *Problemi nadzvichajnih situacij. – 2022. – Vip. 36. – S. 102-122.*
22. **Bilyk S.** Determination of changes in thermal stress state of steel beams in LIRA-SAPR software. /Bilyk S., Bashynska O., Bashynskyi O. // *Strength of materials and theory of structures. 2022. Issue. 108. pp.189-202.*
23. **Koliakova V.M.; Bozhynskyi, M.O.** Porivnialnyi analiz teplotekhnichnykh rozrakhunkiv z danymy otrymanymy pry naturnomu vyprobuvanni. // *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia, Kyiv: KNUBA.- 2016, Issue 61: 288-296 pp.*
24. **Koliakova V.M.; Bozhynskyi, M.O.** Doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu zalizobetonnykh kolon pry dii temperaturnykh vplyviv za dopomohoiu PK LYRA 9.6. // *Komunalne hospodarstvo mist, 2009, Issue 109: pp. 27-32.*

#### CALCULATED ASSESSMENT OF FIRE RESISTANCE OF FIREPROOF REINFORCED CONCRETE BUILDING STRUCTURES BY PC LIRA-SAPR TOOLS

Mariia BARABASH,  
Andrew KOVALIOV,  
Maryna ROMASHKINA

Стаття надійшла до редакції 16.05.2023

**Summary.** The paper outlines a method for numerical analysis of the stress-strain state in a fireproof RC structure with account of non-stationary temperature fields in concrete and reinforcement for a standard fire temperature using the 'Thermal Analysis' system of the LIRA-SAPR program.

The paper also describes the finite element models that enable the user to evaluate the effectiveness of fire protection in the structures and determine the ultimate fire resistance of RC structures.

To illustrate the method, an analysis of a fireproof multi-cavity RC slab on fire resistance is taken as an example. The paper demonstrates the finite element models of fireproof building structures with fireproof coatings of various types. For such structures, an analysis of fire resistance is carried out, and the temperature distribution is determined at nodes of the FE model. The physical and mechanical properties of materials are modified according to the temperature fields obtained. The bearing capacity of the structure is checked for force and temperature loads.

The authors obtained the temperature distribution in the FE model of a fireproof RC slab at 120 and 240 minutes under a standard fire temperature. The results of the numerical analysis of unsteady heating of a fireproof RC slab in the LIRA-SAPR software were compared with experimental tests in a fire furnace. The convergence of experimental data and values obtained in analysis is satisfactory.

The application of the proposed method makes it possible to accurately evaluate the fire resistance of reinforced concrete structures and predict their stress-strain state during a fire.

**Keywords.** Finite element models; numerical modelling; LIRA-SAPR software; temperature distribution; nonlinear thermal conductivity; steady and transient heat transfer; convective heat transfer; concrete creep; fire resistance; fire protection