

## УДК 614.841.332

*Ю. А. Отрош, д.т.н., професор, нач. каф. (ORCID 0000-0003-0698-2888)*

*А. І. Ковальов, к.т.н., с.н.с., докторант (ORCID 0000-0002-6525-7558)*

*Р. Р. Пурденко, аспірант (ORCID 0000-0001-6467-4133)*

*Н. В. Рашкевич, PhD, викл. каф. (ORCID 0000-0001-5124-6068)*

*Р. І. Майборода, викл. каф. (ORCID 0000-0002-3461-2959)*

*Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*

## ВОГНЕСТІЙКІСТЬ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ ОБ'ЄКТІВ

Розроблено структурно-логічну схему забезпечення вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій на основі запропонованої математичної моделі та розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. Розроблено математичну модель оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій, яка включає в себе виконання таких етапів: вибір апарату формалізації, побудова зовнішнього опису, перевірка працездатності моделі, побудова внутрішнього стану, перевірка працездатності та ідентифікація параметрів. Сформульовані початкові та граничні умови при побудові зазначених моделей, які дозволяють з достатньою для інженерних розрахунків точністю прогнозувати вогнестійкість вогнезахисної залізобетонної конструкції. Розроблено комп'ютерну модель напружено-деформованого стану вогнезахисного багатопустотного залізобетонного перекриття в програмному забезпеченні «ЛІРА-САПР» для підвищення рівня пожежної безпеки будівель та споруд. Проведено статичний розрахунок вогнезахисної залізобетонної багатопустотної плити перекриття, в результаті якого отримано напружено-деформований стан перекриття при сумісній дії силових і температурних навантажень. Проведено порівняння результатів чисельного моделювання з результатами експериментального дослідження вогнестійкості. Перевірено точність розробленої комп'ютерної моделі для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. Встановлено нелінійні закони деформування матеріалів конструкцій, а саме: експоненціальний та кусково-лінійний, які враховують модуль пружності бетону, коефіцієнт лінійної температурної деформації бетону, граничну відносну деформацію бетону, які дозволяють з достатньою для інженерних розрахунків точністю (до 5 %) оцінювати вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій.

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

### 1. Вступ

Забезпечення пожежної безпеки – один із важливих напрямків щодо охорони життя та здоров'я людей, національного багатства і навколишнього середовища. Незважаючи на значний поступ у науково-технічній сфері, людству ще не вдалося знайти абсолютно надійних засобів щодо забезпечення пожежної безпеки. Більше того, статистика свідчить, що при зростанні чисельності населення на 1 %, кількість пожеж збільшується приблизно на 5 %, а збитки від них зростають на 10 %. Сьогодні, коли людство живе в третьому тисячолітті своєї багатовікової історії, питання пожежної безпеки залишаються актуальними.

Проведений аналіз статистичних даних виникнення пожеж за останні роки, аналіз сучасних методів та підходів щодо вогнестійкості залізобетонних конструкцій, дає можливість стверджувати щодо існування потреб в удосконаленні методів оцінювання вогнестійкості залізобетонних конструкцій, що допоможе запобігти руйнуванню конструкцій та зменшити кількість загиблих при виникненні надзвичайних ситуацій або пожеж [1].

Саме тому створення основ ефективного оцінювання вогнестійкості

вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів є актуальною проблемою.

## 2. 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 [2].

В [3] розглянуто підвищення вогнестійкості залізобетонних конструкцій з поліпропіленового мікрОВОлокна. Зростання будівництва багатоповерхових, технічно складних будівель і споруд є передумовою широкого використання конструкцій з важкого бетону. Особливий вид руйнування цього типу бетону розглядається при дії вогневого вибуху. Одним із способів захисту є поліпропіленове мікрОВОлокно, метою якого є підвищення вогнестійкості бетонних та залізобетонних конструкцій. Показано, що поліпропіленове мікрОВОлокно може повністю запобігти вибуховому руйнуванню бетону. Проте, поза увагою дослідників залишилися питання підвищення вогнестійкості залізобетонних конструкцій з використанням вогнезахисних покриттів та розрахунок вогнестійкості з використанням сучасних програмних комплексів. Це пов'язано з труднощами побудови комп'ютерної моделі вогнезахищеної конструкції в таких комплексах, і правильному задаванні параметрів вогнезахисних матеріалів.

В [4] послідовно проведений аналіз теплового напруження конструкцій із залізобетону за допомогою програмного забезпечення ABAQUS. Авторами здійснено порівняння результатів термічного аналізу з акцентом на вплив граничних умов. Для моделювання теплопередачі від навколишнього середовища до елемента конструкції під час пожежі використовувалися два типи кінцевих елементів. Однак, залишилися невирішеними питання оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних перекриттів, а також вплив параметрів вогнезахисних покриттів на вогнестійкість конструкцій.

В [5] наданий огляд питань вогнестійкості колони із залізобетону. Вогнестійкість колон традиційно визначається експериментальним методом. Протягом тривалого часу проектування колон проводиться на основі табличних значень, отриманих експериментальним методом. На сьогоднішній день впроваджено новий підхід, який враховує ряд основних характеристик колони під час пожежі, розроблено ряд рівнянь для прогнозування вогнестійкості колони. Однак, незважаючи на прогрес в питаннях вивчення взаємозв'язку між вогнестійкістю залізобетонних колон та найбільш важливими її параметрами, невирішеними залишилися питання оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій з застосуванням сучасних програмних комплексів.

В [6] представлений імовірнісний термомеханічний аналіз за допомогою методу кінцевих елементів на вогнестійкість залізобетонних конструкцій. Представлена ймовірнісна методологія досліджує вплив зміни теплових властивостей бетону на пожежну безпеку конструкцій. В роботі враховані невизначеності, які пов'язані з тепловими та механічними властивостями бетону, навантаженням на ґрунт та температурами, описаними стандартною кривою

температура-час. Враховуються два критерії невдач: максимальна температура 300 °С на армуванні та на основі залежної від температури міцності, як це передбачено Єврокодом EN 1992-1-2. Незважаючи на практичну значимість таких результатів, залишилися не розглянуті в достатній мірі питання щодо розрахунків вогнезахисних залізобетонних конструкцій.

В [7] розглянуто перспективи розвитку задач з забезпечення вогнестійкості залізобетонних та попередньо напружених бетонних конструкцій – забезпечення безпеки, технології ремонту після пожежі. Однак, в роботі залишилися нерозкритими питання щодо побудови комп'ютерної моделі вогнезахисних залізобетонних конструкцій, а саме залізобетонних перекриттів для оцінювання вогнестійкості.

В [8] наведено результати моделювання випробувань вогнестійкості бетонних та залізобетонних конструкціях. У цій роботі розглядаються статистичні дані про великі пожежі в міських районах, з представленням детального переліку причин пожеж, типів пошкоджень бетону та залізобетонних конструкцій. Авторами наведено сучасний експериментальний підхід до вивчення вогнестійкості різних компонентів конструкції, використовуючи чисельне моделювання наданий більш детальна інформація щодо кількісної оцінки полів температури та теплового потоку. Проте, не визначено, як даний підхід можна застосовувати для вогнезахисних залізобетонних конструкцій з урахуванням їх напружено-деформованого стану. На практиці це може викликати труднощі, що пов'язані з потребами враховувати теплофізичні характеристики вогнезахисних покриттів для підвищення меж вогнестійкості залізобетонних конструкцій, механічних властивостей конструкції.

В [9] описано особливості впливу корозії арматури на несучу здатність залізобетонних колон при «стандартній» пожежі. На основі стандартного методу розрахунку вогнестійкості колони оцінювалась за чотиристороннім вогневим ефектом з урахуванням різної тривалості пожежі. Дослідженням передбачалось, що початок корозії бетону та арматури відбудеться після 10 років експлуатації. Було встановлено, що руйнування бетонного захисного шару товщиною 25 мм у середньо-агресивному середовищі відбудеться через 25 років, а діаметр армування за цей період зменшиться на 20 %. Щоб порівняти результати, залізобетонна колона перетином 400x400 мм була розрахована під впливом «стандартної» пожежі за нормальних умов експлуатації та з урахуванням роботи в агресивному середовищі. Однак, запропонована в роботі модель не враховує використання вогнезахисних залізобетонних конструкцій з науково-обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів.

В [10] розглянуто вплив сценарію пожежі на вогнестійкість залізобетонної каркасної конструкції. Розуміння продуктивності та реакції каркасних конструкцій при пожежі має особливе значення для проектування вогнестійкої конструкції. Спеціалізована комп'ютерна програма SAFIR дозволяє проводити аналіз різних типів конструкцій, побудованих з різних конструкційних матеріалів. Варіанти програми SAFIR представлені у восьми різних сценаріях пожежі стандартної пожежної огорожі двоярусного залізобетонного каркасу з трьох ярусів. За об'єкт експериментального та аналітичного дослідження взята 11-поверхова залізобетонна конструкція після серйозних початкових пошкоджень. Початкові пошкодження були спричинені одночасним вибухом (видаленням) чотирьох сусідніх колон першого поверху та двох сегментів балки по периметру другого поверху. Для перевірки точності побудованої моделі використовувався

тільки обчислювальний експеримент при оцінюванні вогнестійкості конструкцій, що розглядаються, але без системи вогнезахисту.

В [11] приведений розрахунок вогнестійкості колон із залізобетону. Вогнестійкість залізобетонних колон визначається розрахунком у залежності від розміру, ексцентриситету навантаження, довжини вигину, відсотка армування, а також коефіцієнта безпеки покриття та конструкції. Авторами наведено прості правила проектування вогнестійкості з точки зору розміру, покриття та типу заповнювача. Проте, залишилися не розглянуті достатньою мірою питання щодо розрахунків вогнезахисних залізобетонних колон з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів та їх порівняння з експериментальним визначенням вогнестійкості (розрахунково-експериментальний метод).

В [12] наведені науково-дослідні основи випробування вогнестійкості залізобетонних конструкцій. Обговорюються прориви у розвитку науки та техніки випробувань на вогнестійкість, їх сучасний стан та даються уявлення про майбутній розвиток випробувань на вогнестійкість, а також наводяться напрями, в яких необхідні більш глибокі дослідження. Широке застосування технологій та обчислювальних методів відкрило теоретичний погляд, який дає точне уявлення про динаміку пожежі та дає можливість для розробки більш ефективних методів. Проте, поза увагою дослідників залишилися питання оцінювання вогнестійкості згинальних залізобетонних елементів в умовах пожежі з використанням сучасних програмних комплексів, що полегшують процедуру оцінювання вогнестійкості.

З огляду на вище зазначене, основна частина досліджень зарубіжних та вітчизняних науковців присвячена вивченню питань вогнестійкості залізобетонних конструкцій. Однак, пропозиції щодо визначення вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій що знаходяться в експлуатації, які можна представити у зручній формі, відсутні [13].

Таким чином, невирішеною частиною проблеми є відсутність можливості оцінити вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій за допомогою адекватних комп'ютерних моделей, які дозволять моделювати нестационарний прогрів вогнезахисних залізобетонних конструкцій та їх напружено-деформований стан. При цьому, такі моделі повинні мати можливість визначати температуру в будь-якому перерізі конструкції (в будь-якій точці та момент часу) за умов впливу різних температурних режимів пожежі, враховувати параметри вогнезахисних покриттів, механічні характеристики матеріалів конструкції, залежних від температури.

### **3. Мета і завдання дослідження**

Метою дослідження є проведення оцінки вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій за допомогою розробленої комп'ютерної моделі напружено-деформованого стану в програмному забезпеченні «ЛІРА-САПР» для підвищення рівня пожежної безпеки будівель та споруд.

Для досягнення поставленої мети потребували вирішення наступні завдання:

- розробити структурно-логічну схему забезпечення вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій;
- побудувати математичний опис процесу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій;
- розробити комп'ютерну модель напружено-деформованого стану вогнезахисного багатопустотного залізобетонного перекриття в програмному комплексі «ЛІРА-САПР»;

– провести оцінювання вогнестійкості вогнезахищеного багатопустотного залізобетонного перекриття за допомогою розробленої моделі.

#### 4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом випробування була обрана плита перекриття багатопустотна залізобетонна ПК 48-12-8 розмірами 4780×1190 мм та товщиною 220 мм (рис. 1).

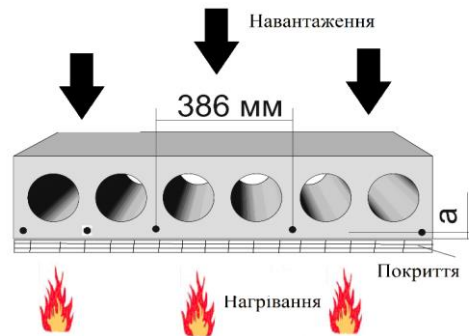


Рис. 1. Схема температурних та статичних навантажень на плиту

Плита має несучий сталевий каркас, який складається з п'ятих нижніх поздовжніх несучих арматурних стержнів 12 мм (марка арматури: попередньо напружена А500С) та арматурної проволочки 4 мм Вр1. Бетон класу С12/15. Середнє значення товщини захисного шару бетону до нижньої несучої арматури склав 20 мм. Межа вогнестійкості плити за даними виробника становить REI 45. На зразки знизу та з боків плит за допомогою штукатурного агрегату наносився шар речовини із вогнезахисного покриття (штукатурки) товщиною 25,9 мм.

Зразки залізобетонного перекриття встановлювались на горизонтальній печі (статично невизначена схема обпирання) з обпиранням по краях через компенсуючі опори з базальтових плит завтовшки 40 мм.

Навантаження здійснено каліброваними вантажами у вигляді бетонних блоків, які встановлювались на зразках через компенсуючі опори. Фактичне навантаження на зразки встановлено, виходячи з створення у плитах напружень, що відповідають напруженням від питомого розподільчого навантаження 570 кг/м<sup>2</sup>. Плита 4,780×1,190 м=5,6882 м<sup>2</sup>. F=3242,274 кг.

Граничне значення прогину зразків складає 220 мм (прогін b=4400 мм, розрахункова товщина плит 220 мм), а граничне значення швидкості наростання деформації – 9,8 мм/хв.

Випробування тривали 242 хв. Значення прогину та швидкості наростання деформації зразків на 242 хв. випробувань склали, відповідно, 42 мм та 0,4 мм/хв. (зразок № 1) і 46 мм та 0,4 мм/хв. (зразок № 2).

Для вимірювання середньої та максимальної температури з необігрівної поверхні вогнезахищеного перекриття було встановлено по 5 термопар, одна термопара – у центрі зразка та чотири – в геометричних центрах чвертей зразка. Температури, отримані в результаті випробувань на вогнестійкість, використовували для знаходження теплофізичних характеристик бетону та пасивного вогнезахисного покриття, що досліджувалось.

Розрахунки були виконані на ліцензованій комп'ютерній програмі, яку надано ТОВ «ЛІРА САПР» (Україна) (ліцензія № 1/8583 від 16.02.2022).

#### 5. Розробка структурно-логічної схеми забезпечення вогнестійкості

## вогнезахисних залізобетонних конструкцій

В процесі виконання наукових досліджень запропоновано наступний алгоритм: математичне моделювання конструкцій методом скінченних елементів; визначення зусиль і деформацій в конструкціях; порівняння характеру деформацій реального об'єкту і математичної моделі й подальше уточнення, у разі потреби, характеристик жорсткості матеріалів елементів моделі; розрахунок уточненої моделі, визначення зусиль і переміщень; перевірка дотримання умов, які забезпечують несучу здатність і деформативність залізобетонних конструкцій, будівель та споруд.

На рис. 2 представлено керуючий алгоритм та процедуру реалізації розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій.

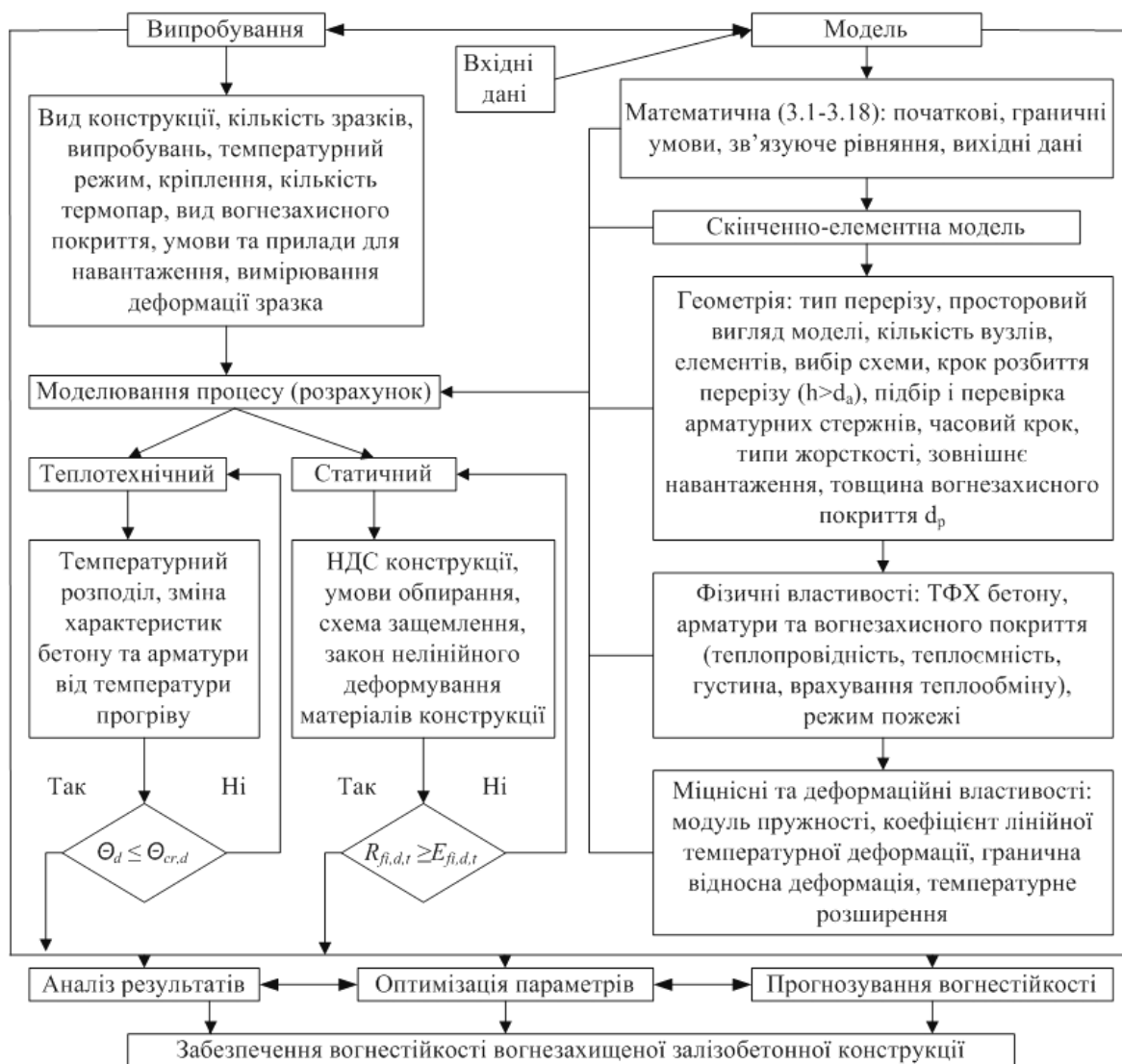


Рис. 2. Керуючий алгоритм та процедура реалізації розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій

Структурно-логічна схема реалізації запропонованого методу передбачає 9 блоків розташованих на 5 рівнях, пов'язаних логічними зв'язками та включає експериментальну і розрахункову частини. Експериментальна частина методу передбачає проведення серії випробувань на вогнестійкість при заданих режимах пожежі (стандартний, зовнішньої, вуглеводневої, тунельної, реальної пожежі).

Розрахункова частина містить наступні обов'язкові процедури: побудову розрахункової моделі фізичного процесу; ідентифікацію за даними випробувань на вогнестійкість теплофізичних характеристик моделі на основі розв'язання обернених задач теплопровідності; визначення характеристик вогнезахисної здатності покриттів за результатами випробувань на вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій при різних умовах випробувань (температурні режими пожежі, умови закріплення, навантаження зразків, схему вимірювання температур, кліматичні фактори), розрахунок напружено-деформованого стану конструкції.

## 6. Розробка математичної моделі розрахунку вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій

В результаті проведених досліджень розроблено математичну модель оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. При цьому застосовано алгоритм, що включає виконання таких етапів: вибір апарату формалізації, побудова зовнішнього опису, перевірка працездатності моделі, побудова внутрішнього стану, перевірка працездатності та ідентифікація параметрів.

Сформульовані початкові та граничні умови при побудові зазначених моделей. Початкова умова  $t=0$ ,  $T(x,y,0)=T_0=\text{const}$ .

$$c_v(x, T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(x, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (1)$$

де  $T=T(x,y, t)$ ,

$$\lambda_{\text{ВП}} \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = \alpha^* [T_{C1}(\tau) - T(0, \tau)], \quad (2)$$

$$\alpha^* = \alpha_{C1} + \frac{C_0 \varepsilon}{T_{C1}(t) - T(0, t)} \left\{ \left[ \frac{T_{C1}(t)}{100} \right]^4 - \left[ \frac{T(0, t)}{100} \right]^4 \right\} + \alpha_{\phi T C}. \quad (3)$$

У формулі (3)  $\alpha_{\phi T C}$  – емпірично виведений коефіцієнт теплообміну між обігрівною поверхнею та повітрям навколишнього середовища з урахуванням відносної вологості  $\phi$ , температури  $T$  та твердих домішок в повітрі  $C$ . У формулі (3):

$$\alpha_{\phi T C} = 20 + 0,19 \cdot T + 0,029 \cdot C + 0,0082 \cdot \phi \cdot T - 0,0025 \cdot \phi \cdot C - 0,0005 \cdot T \cdot C - 0,001 \cdot \phi^2 - 0,001 \cdot T^2 + 0,0015 \cdot C^2$$

гранична умова конвективного теплообміну з навколишнім середовищем на границі  $X=X_6$  (багатошарова стінка із зразком):

$$\lambda_6 \frac{\partial T(X, \tau)}{\partial x} = \alpha^{**} [T(X, \tau) - T_{C2}], \quad (4)$$

$$\alpha^{**} = \alpha_{C2} + \frac{C_0 \varepsilon}{T(X, \tau) - T_{C2}(\tau)} \left\{ \left[ \frac{T(X, \tau)}{100} \right]^4 - \left[ \frac{T_{C2}(\tau)}{100} \right]^4 \right\},$$

$$\alpha_{C2} = A [T(X, \tau) - T_{C2}(\tau)]^{0,33}. \quad (5)$$

Двовимірна математична модель являла собою систему рівнянь:

– рівняння енергії для перекриття (бетон і повітря):

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + V_x + V_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (6)$$

– рівняння руху повітря в порожнині при вільній конвекції:

$$\rho \left( \frac{\partial V_x}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial \tau} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) = \rho g - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \cdot \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \cdot \frac{\partial V_y}{\partial y} \right), \quad (7)$$

$$\rho \left( \frac{\partial V_y}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial \tau} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \cdot \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \cdot \frac{\partial V_y}{\partial y} \right); \quad (8)$$

– рівняння нерозривності для повітря в порожнині:

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y}; \quad (9)$$

– рівняння стану стискання газу для повітря в порожнині:

$$P \cdot V = \frac{R \cdot T}{m}; \quad (10)$$

– рівняння радіаційного теплообміну між стінками порожнин перекриття з повітрям, прозорим для радіаційних променів:

$$\frac{\partial q_r(x, y)}{\partial l} = \varepsilon \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} q_r(x, y) d\phi; \quad (11)$$

– граничні умови радіаційно-конвективного теплообміну з обігрівної і не обігрівної поверхнях згідно (1)–(5);

– умови симетрії (відсутності теплообміну) на бічних гранях періодичної частини розглянутої залізобетонної плити:

$$\frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial T(x, 0, t)}{\partial y} = 0. \quad (12)$$

В (6)–(12):  $\mu$  – динамічна в'язкість;  $q_r$  – радіаційний потік на поверхні порожнини з координатою  $x$  і  $y$  в напрямку  $l$ ;  $d\phi$  – зміна кутového коефіцієнта;  $\sigma$  – постійна Стефана-Больцмана;  $V$  – об'єм повітря в порожнині;  $P$  – тиск повітря в порожнині;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $R$  – універсальна газова постійна.

Система диференціальних рівнянь механічної рівноваги:



$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} + X = 0, \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} + Y = 0, \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + Z = 0. \end{cases} \quad (13)$$

У разі деформації тіла, заданої переміщеннями  $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$ , паралельними напрямкам осей, подовження та здвиги будуть відповідно рівні:

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, & \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, & \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \\ 2\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y}, & 2\varepsilon_{yz} = \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z}, & 2\varepsilon_{zx} = \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}. \end{cases} \quad (14)$$

Температурні напруження:

$$\sigma_{ik} (I, k=x, y, z). \quad (15)$$

Повні подовження складаються з подовжень, спричинених зміною температури, та подовжень, обумовлених напруженнями:

$$\varepsilon_{ik} = \frac{1}{2G} \left[ \sigma_{ik} - \frac{\mu}{1+\mu} s \delta_{ik} \right] + \alpha T \delta_{ik}. \quad (16)$$

Нелінійна залежність між напруженнями і деформаціями:

$$a(u,v)=e(v)=0. \quad (17)$$

Вираз потенційної енергії для тривимірного напруженого стану має вигляд:

$$\Pi = \int_{\Omega} \varepsilon^T \sigma d\Omega = \int_{\Omega} (Bu)^T D \cdot (Bu) d\Omega. \quad (18)$$

Особливістю розроблених моделей є врахування теплофізичних характеристик залізобетонних конструкцій та вогнезахисних покриттів, особливостей формування режимів пожежі, міцнісних та деформаційних властивостей матеріалів при впливі пожежі.

Відмінність рівнянь запропонованої моделі від існуючих аналогів полягає в тому, що у формулі (3) вперше емпірично виведено коефіцієнт теплообміну між обігрівною поверхнею та повітрям навколишнього середовища  $\alpha_{\text{фТС}}$  з урахуванням відносної вологості  $\varphi$ , температури  $T$  та твердих домішок в повітрі  $C$ .

## 7. Розробка скінченно-елементної моделі напружено-деформованого стану вогнезахисного багатопустотного залізобетонного перекрыття

Розрахунки конструкцій будівель можна виконати також за допомогою розрахункових комплексів, які розроблено вітчизняними вченими. До таких комплексів відноситься програмний комплекс «ЛІРА-САПР». За експериментальними значеннями середньої за об'ємом температурної кривої та за стандартною температурною кривою було здійснено розрахунок деформацій плити перекриття. Для визначення межі вогнестійкості плитних або балочних конструкцій за умови настання граничного стану по несучій здатності необхідно виконати теплотехнічну і статичну частину розрахунку. За результатами теплотехнічної частини розрахунку визначається зона руйнування за умов нагрівання точковим джерелом тепла і розподіл температур по товщині конструкції. Розподіл температур по товщині конструкції може бути прийнятим за результатами проведених раніше досліджень. В результаті розрахунку показано, що обвалення починається при утворенні пластичного шарніра в області максимального прогину плити або балки, тобто в середині довжини. Такі ж явища фіксувалися при спостереженні за процесом випробування.

У програмному комплексі «ЛІРА-САПР» авторами було проведено скінченно-елементний аналіз розглянутого вогнезахисного залізобетонного перекриття. Розрахунок проводився із врахуванням фізичної нелінійності, при формуванні наступних параметрів (рис. 3).

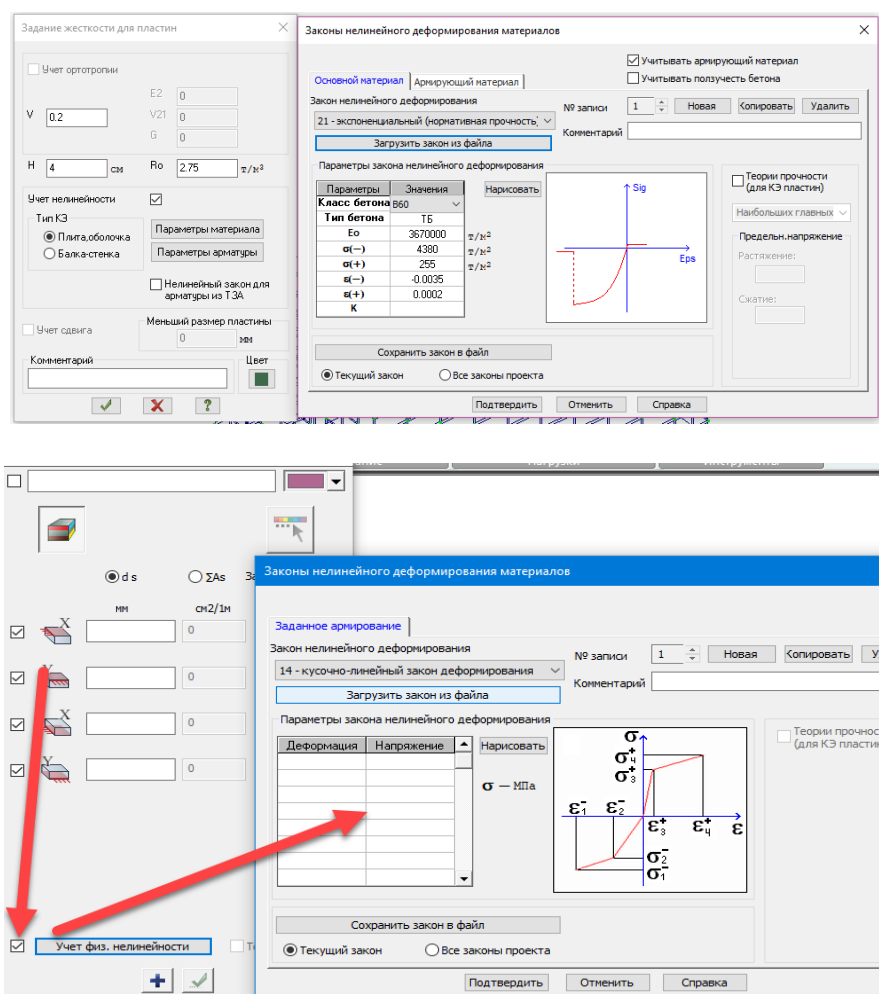


Рис. 3. Формування закону нелінійних деформацій

нелінійні деформації. Для врахування нелінійності в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» був обраний простий кроковий метод з кількістю кроків рівним 30. Для виконання нелінійного розрахунку в програмному комплексі «ЛІРА-САПР», з урахуванням статичного закону повзучості в часі (EuroCode prEN 1992-1-1), попередньо обчислюється коефіцієнт повзучості  $\varphi_0$  і коефіцієнт  $\beta_H$ , які залежать від відносної вологості ( $R_H$ , %) і умовного розміру перерізу ( $h_0$ , мм).

В задачах механіки пружного тіла лінійність завжди являлась наслідком:

- лінійного зв'язку між деформаціями та переміщеннями;
- лінійного зв'язку між напруженнями та деформаціями.

На рис. 4 показані закони нелінійного деформування бетону, що застосовуються в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» (11 – експоненціальний закон деформування; 14 – кусково-лінійний закон деформування).

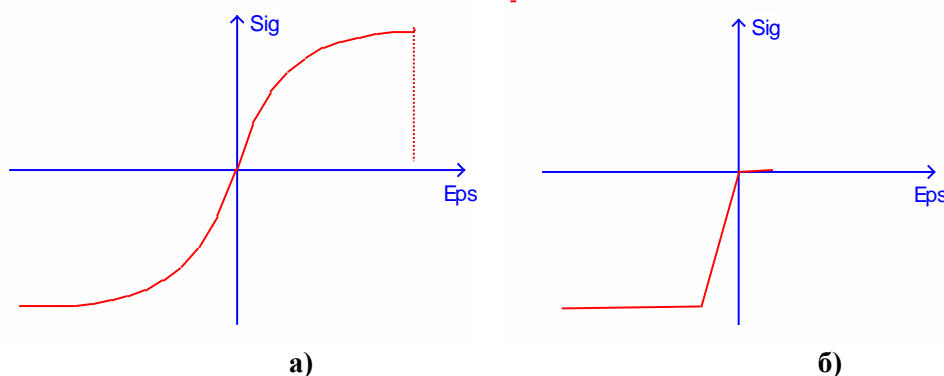


Рис. 4. Закони нелінійного деформування бетону: а – експоненціальний; б – кусково-лінійний

Температура в першій фібрі бетонного перерізу змінюється від початкової (20 °С до 200 °С) за час прогріву при стандартному температурному режимі пожежі в 240 хвилин.

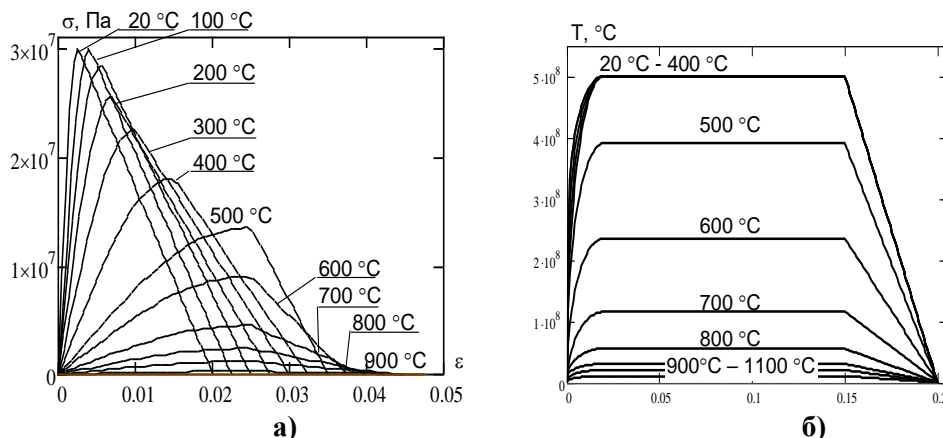


Рис. 5. Діаграми деформування: а – бетону; б – арматурної сталі

На рис. 6 показаний приклад порівняння змін характеристик матеріалу (граничної міцності на стиск, розтяг та граничних деформацій) в залежності від температури.

Особливий акцент при вивченні полів температур, приведених на рис. 7, 8 слід звернути на прогрів порожнин багатопустотного залізобетонного перекриття. Правильність задавання теплофізичних та механічних характеристик саме цього

шару найбільше впливає на точність моделювання.

Необхідно зазначити, що для знаходження еквівалентного коефіцієнту теплопровідності шару з порожнинами існує декілька підходів. Перший підхід базується на задаванні в порожнинах повітря з його характеристиками (табл. 1). При другому підході можливо реалізувати відсутність конвективного і радіаційного теплообміну, проте це призводить до великих похибок. І третій підхід дозволяє враховувати всі види теплообміну шляхом задавання порожнин як твердого тіла з еквівалентним коефіцієнтом теплопровідності, що в кожному випадку розраховується окремо.

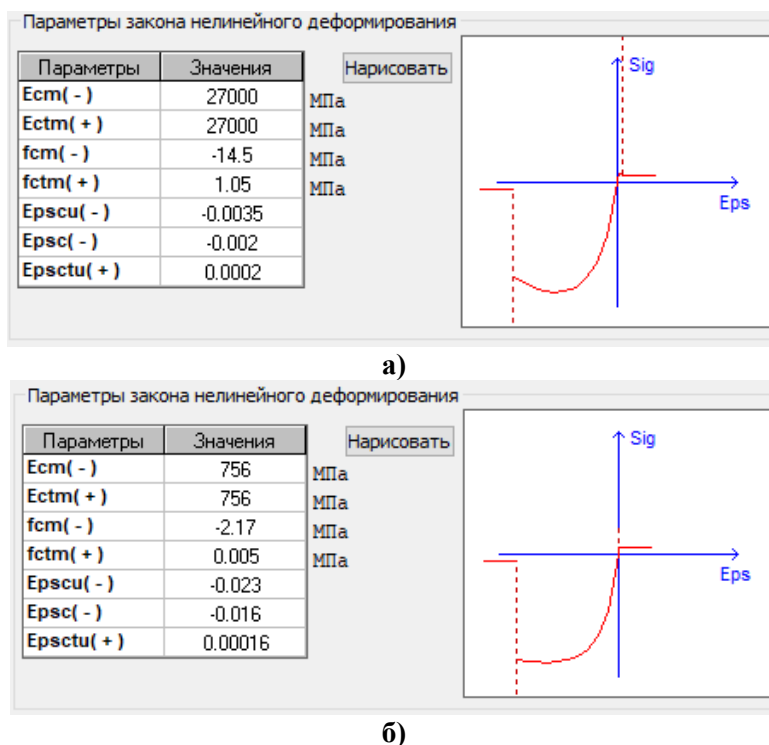


Рис. 6. Порівняння параметрів деформування бетону при температурі: а – 20 °С; б – 800 °С

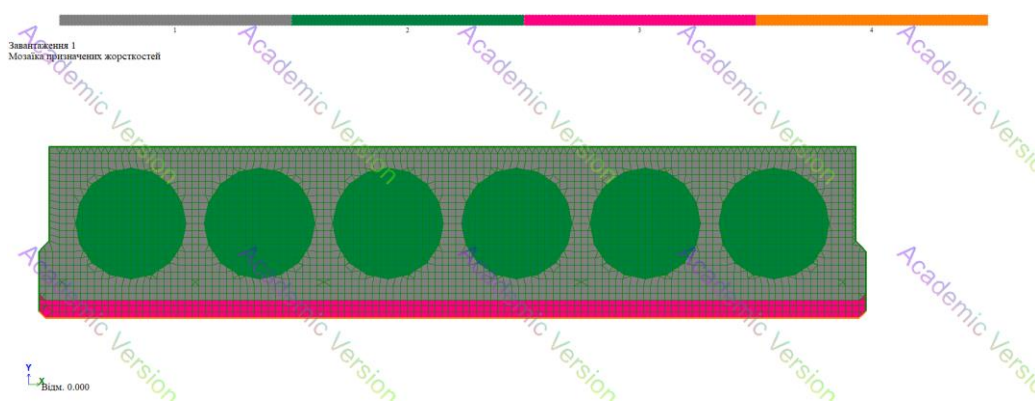


Рис. 7. Мозаїка призначених жорсткостей

## 8. Оцінювання вогнестійкості вогнезахисеного багатопустотного залізобетонного перекриття за допомогою розробленої моделі

Розв'язання задачі нестационарної теплопровідності зводилося до визначення температури бетону вогнезахисеного залізобетонного перекриття у будь-якій точці поперечного перерізу в заданий час.

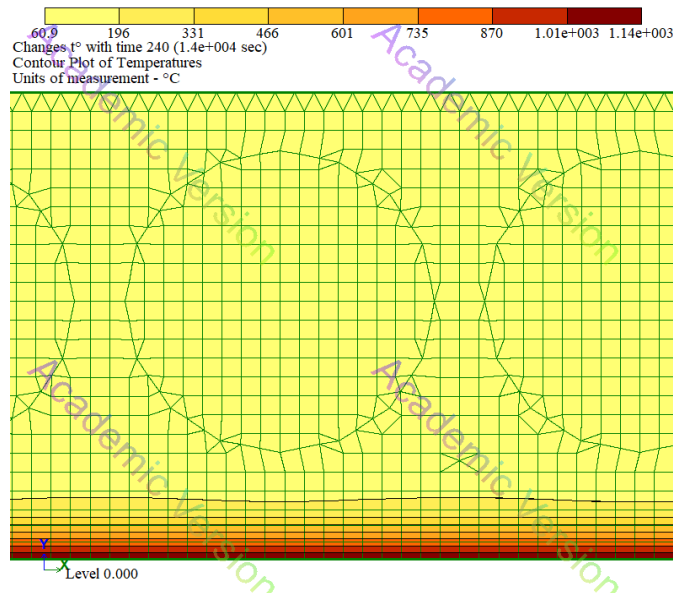
Змодельованим елементам скінчено-елементної моделі було призначено типи жорсткості, як зображено в табл. 1.

**Табл. 1. Характеристики жорсткості для моделювання**

Номер	Ім'я	Коментар	H, см	K, Дж/(м·с·°C)	C, Дж/(кг·°C)	R <sub>0</sub> , Н/м <sup>3</sup>
1	Теплопровідність	Бетон	100	1,300	970	23030
2	Теплопровідність	Повітря	100	3,180	950	12,76
3	Теплопровідність	Вогнезахист	100	0,071	2000	4903
4	Конвекція	Поверхня обігріву	100	a= 25Дж/(с·м <sup>2</sup> ·°C)	–	–

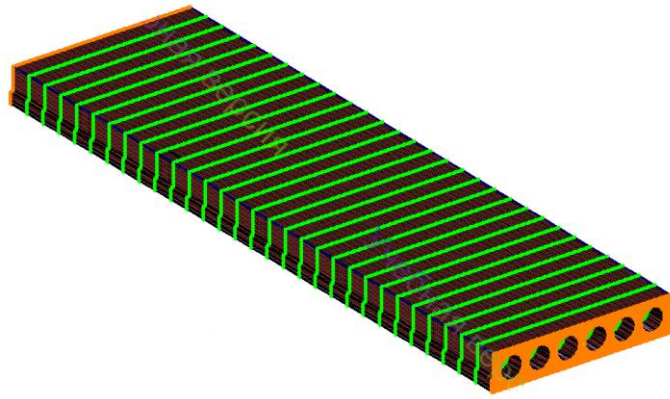
Для розв'язання рівняння теплопровідності використовувався метод скінчених елементів, реалізований в програмі ЛІРА-САПР, для якого більшість верифікаційних тестів для згинальних конструкцій дають похибку в межах 5 %, а для стержневих – менше 1 %.

В результаті чисельного моделювання були отримані розподіли температур у вогнезахисному багатопустотному перекритті на 240 хвилині вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі (рис. 8).



**Рис. 8. Ізополя температур**

Наступним етапом було моделювання напружено-деформованого стану вогнезахисного залізобетонного перекриття. Для цього в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» була побудована модель (рис. 9) та прикладені навантаження 5,7 кН/м<sup>2</sup> та власна вага перекриття.



**Рис. 9. Комп'ютерна модель напружено-деформованого стану вогнезахищеного залізобетонного перекриття**

Застосовані закони деформування матеріалів моделі, а саме: експоненціальний та кусково-лінійний, які враховують модуль пружності бетону, коефіцієнт лінійної температурної деформації бетону, граничну відносну деформацію бетону.

Значення найбільш значущих (вагомим) параметрів, залежних від температури, для статичної задачі приведені нижче:

модуль пружності бетону:

$E_s, (20\text{ }^\circ\text{C}) = 1,2 \cdot 10^4$  МПа початковий модуль пружності бетону;

$E_s, (200\text{ }^\circ\text{C}) = 1,14 \cdot 10^4$  МПа модуль пружності бетону при  $200\text{ }^\circ\text{C}$ ;  
 $k(200) = 0,95$  – коефіцієнт зниження для міцності або деформативності за температури  $\theta$ ;

$E_s, (400\text{ }^\circ\text{C}) = 0,9 \cdot 10^4$  МПа модуль пружності бетону при  $400\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $k(400) = 0,75$ ;

$E_s, (600\text{ }^\circ\text{C}) = 0,54 \cdot 10^4$  МПа модуль пружності бетону при  $600\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $k(600) = 0,45$ ;

$E_s, (800\text{ }^\circ\text{C}) = 0,18 \cdot 10^4$  МПа модуль пружності бетону при  $800\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $k(800) = 0,15$ ;

$E_s, (1000\text{ }^\circ\text{C}) = 0,048 \cdot 10^4$  МПа модуль пружності бетону при  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ ;  
 $k(1000) = 0,04$ .

Модуль пружності сталі приймається рівним  $E_s = 2,1 \cdot 10^5$  МПа як при розтягу, так і при стиску.

коефіцієнт лінійної температурної деформації бетону та сталі:

$\alpha_{ct} (20\text{ }^\circ\text{C}) = 1 \cdot 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ;

$\alpha_{ct} (250\text{ }^\circ\text{C}) = 9 \cdot 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

гранична відносна деформація бетону:

$\varepsilon_{cu1}, (20\text{ }^\circ\text{C}) = 0,02$ ;

$\varepsilon_{cu1}, (200\text{ }^\circ\text{C}) = 0,025$ ;

$\varepsilon_{cu1}, (400\text{ }^\circ\text{C}) = 0,03$ ;

$\varepsilon_{cu1}, (600\text{ }^\circ\text{C}) = 0,035$ ;

$\varepsilon_{cu1}, (800\text{ }^\circ\text{C}) = 0,04$ ;

$\varepsilon_{cu1}, (1000\text{ }^\circ\text{C}) = 0,045$ .

Температурне розширення

Бетон на силікатному заповнювачі:

$\varepsilon_s(\theta) = -1,8 \cdot 10^{-4} + 9 \cdot 10^{-6}\theta + 2,3 \cdot 10^{-11}\theta^3$  для  $20\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 700\text{ }^\circ\text{C}$

$\varepsilon_s(\theta) = 14 \cdot 10^{-3}$  для  $700\text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 1200\text{ }^\circ\text{C}$

$(\Delta l/l) \cdot (10^{-3})$ .

Модель складається з 52206 вузлів та 48599 елементів. Крок розбиття по

перерізу склав  $h=0,01$  м, часовий крок  $\Delta t=60$  с.

На рис. 10 зображено результати статичного розрахунку в програмному комплексі «ЛПРІ-САПР». Як видно із рис. 10 прогин залізобетонного перекриття в середній частині плити складає 39,8 мм, що задовільно корелює з експериментальними результатами (42 мм), а похибка не перевищує 5 %.

Підтвердженням адекватності розробленої комп'ютерної моделі є дані (рис. 11), на якому видно задовільну збіжність експериментальних та розрахункових значень прогину залізобетонного вогнезахищеного перекриття по середині прольоту при умові впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Виходячи з результатів, зображених на рис. 11, можна констатувати правильність побудови комп'ютерної моделі в програмному середовищі «ЛПРІ-САПР», правильність задавання параметрів, початкових та граничних умов. Для доведення цього твердження достатньо дослідити характер кривих зміни значень прогину залізобетонного вогнезахищеного перекриття по середині прольоту від часу вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі.

Як зображено на рис. 11 найбільша область відхилення у температур значеннях прогину спостерігається на 200 хвилині розрахунку і становить близько 3 мм, що складає 5 %. Це означає, що врахування всіх параметрів при побудові комп'ютерної моделі теплових процесів та напружено-деформованого стану в системі «залізобетонне перекриття – вогнезахисне покриття» відкриває можливість для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій з прикладенням навантаження в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму пожежі.

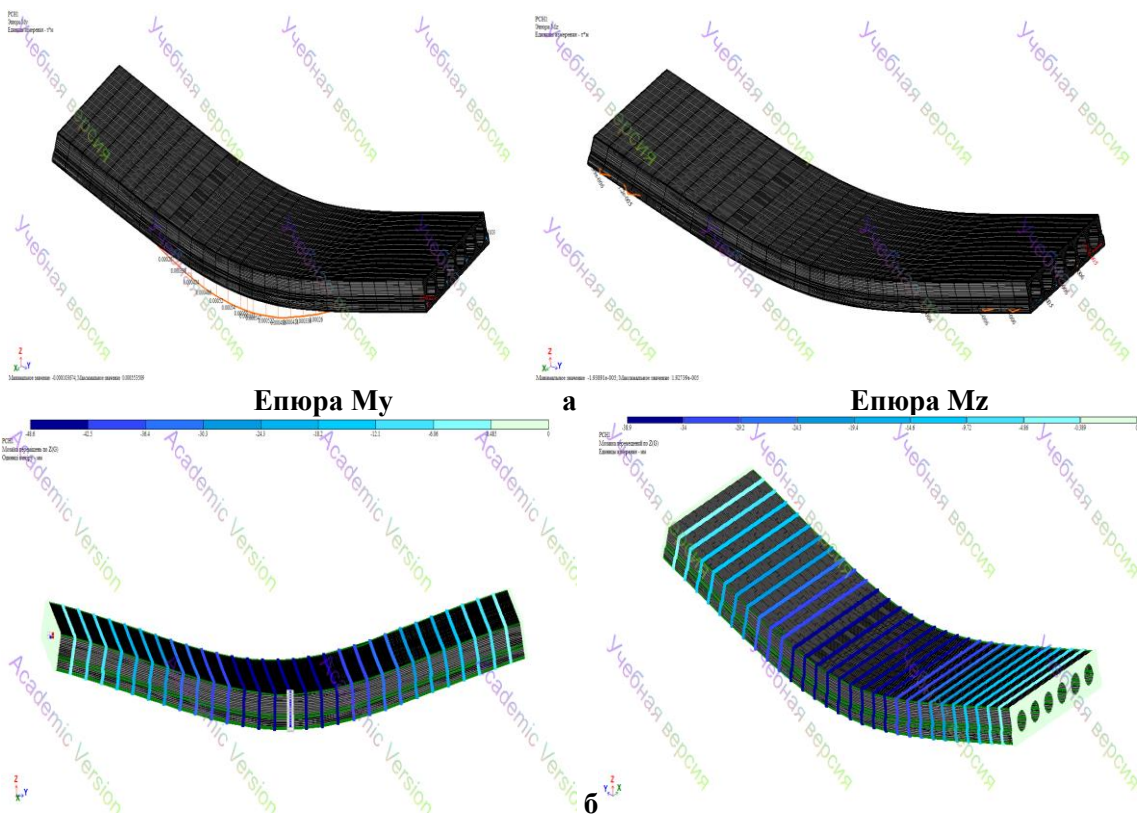
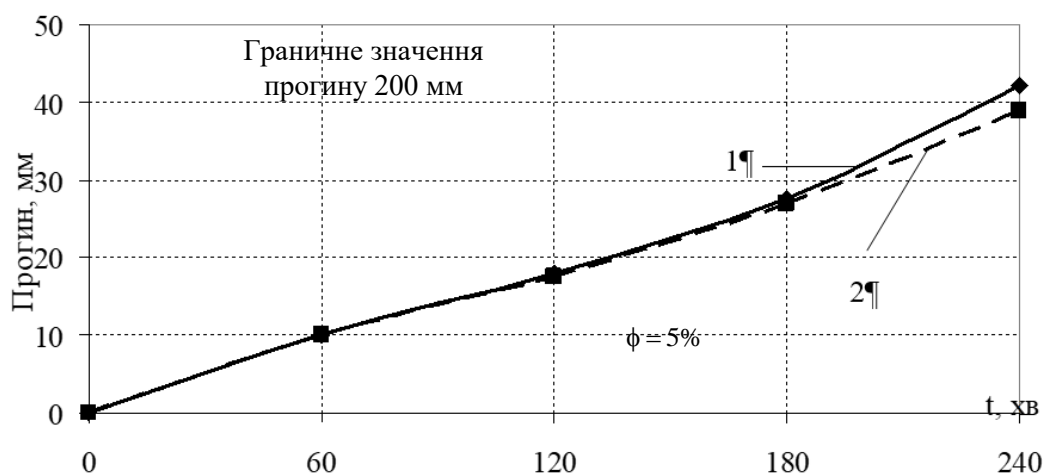


Рис. 10. Еюри моментів (а) та прогини (б) залізобетонної плити перекриття



**Рис. 11.** Прогин залізобетонного вогнезахищеного перекриття по середині прольоту при стандартному температурному режимі пожежі: 1 – експеримент; 2 – розрахунок в програмному комплексі «ЛІРА-САПР»

В результаті досліджень узагальнено можливості роботи комп'ютерної програми «ЛІРА-САПР» в області розрахунку та моделювання вогнестійкості будівельних конструкцій, обґрунтована необхідність проведення досліджень за допомогою цієї програми, обґрунтована можливість впровадження даної програми при введенні будівель в експлуатацію.

### **9. Обговорення результатів оцінювання вогнестійкості вогнезахищеного багатопустотного залізобетонного перекриття**

Мета роботи вирішувалась шляхом оцінювання вогнестійкості вогнезахищеного залізобетонного перекриття за допомогою розробленої комп'ютерної моделі напружено-деформованого стану перекриття в програмному забезпеченні «ЛІРА-САПР» для підвищення рівня пожежної безпеки будівель та споруд. Отримані в результаті статичного розрахунку результати дозволяють визначати значення прогинів залізобетонного вогнезахищеного перекриття по середині прольоту від часу вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі. Отримані розрахункові результати прогину залізобетонного вогнезахищеного перекриття посередині прольоту задовільно корелюють з експериментальними даними, що підтверджує ефективність розробленої моделі. Максимальне значення відхилення прогину спостерігається на 200 хвилині розрахунку і становить близько 3 мм, що складає похибку в 5 %. Підтвердженням цьому є дані (рис. 11), на якому видно задовільну збіжність експериментальних та розрахункових значень прогину вогнезахищеного залізобетонного перекриття. Особливістю розробленої комп'ютерної моделі становить можливість врахування нелінійних законів деформування матеріалів моделі, а саме: експоненціального та кусково-лінійного, які враховують модуль пружності бетону, коефіцієнт лінійної температурної деформації бетону, граничну відносну деформацію бетону. Це, в свою чергу, відкриває можливість для оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій з прикладенням навантаження в умовах вогневого впливу за заданого температурного режиму пожежі. Особливу увагу заслуговує правильність задавання теплофізичних характеристик шару перекриття з порожнинами. Слід зазначити, що неправильність задавання параметрів шару з порожнинами призводить до неточностей у моделюванні. В роботі використано



підхід, що дозволяє враховувати складний радіаційно-конвективний теплообмін в порожнинах перекриття шляхом задавання порожнин як твердого тіла з еквівалентним коефіцієнтом теплопровідності  $3,18 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$ . Такий механізм задавання характеристик шару з порожнинами є тим фактором регулювання точності моделювання, завдяки якому можливо підвищити збіжність результатів розрахункового та експериментального підходу до оцінювання вогнестійкості.

Необхідно зазначити, що недоліком розробленої комп'ютерної моделі є відсутність достовірних даних щодо міцнісних та деформаційних характеристик матеріалу залізобетонної конструкції та теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів. Це призводить до того, що проєктувальники користуються даними, що є в літературі чи нормативних документах. Це не завжди задовольняє вимоги щодо точності та достовірності результатів розрахунків і може призвести до помилкового визначення вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій. До недоліків також можна віднести неможливість оцінювання вогнестійкості конструктивної схеми будівлі із залізобетонних конструкцій та сумісної роботи конструкцій будівлі чи споруди. Неврахування вказаних параметрів при моделюванні накладає певні обмеження на використання отриманих результатів, що може трактуватися як недоліки даного дослідження. Неможливість зняти названі обмеження в рамках даного дослідження породжує актуальний напрям подальших досліджень. Він може бути орієнтований на розробку комп'ютерної моделі конструктивної схеми будівлі з використанням вогнезахисних залізобетонних конструкцій із науково-обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів. 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 є можливість зіткнутися з труднощами опису математичного апарату процесу нестационарного прогріву вогнезахисних залізобетонних конструкцій та їх напружено-деформованого стану при сумісній роботі в конструктивній схемі будівлі, що полягають в правильній побудові комп'ютерної моделі та задавання параметрів з науково обґрунтованими характеристиками.

## 10. Висновки

1. Розроблена структурно-логічна схема забезпечення вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій на основі запропонованої математичної моделі та розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. Структурно-логічна схема реалізації розробленого методу передбачає 9 блоків розташованих на 5 рівнях, пов'язаних логічними зв'язками та включає експериментальну і розрахункову частини. Експериментальна частина методу передбачає проведення серії випробувань на вогнестійкість при заданих режимах пожежі (стандартний, зовнішньої, вуглеводневої, тунельної, реальної пожежі). Також включає процес вибору виду конструкції (горизонтальна, вертикальна), обґрунтування кількості зразків і випробувань, умов 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 навантаження та вимірювання деформації

зразка. Розрахункова частина містить наступні обов'язкові процедури: побудову розрахункової моделі фізичного процесу (комп'ютерна, кінцево-елементна моделі); ідентифікацію за даними випробувань на вогнестійкість теплофізичних характеристик моделі на основі розв'язання обернених задач теплопровідності; визначення характеристик вогнезахисної здатності покриттів за результатами випробувань на вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій при різних умовах випробувань (температурні режими пожежі, умови закріплення, навантаження зразків, схеми вимірювання температур, впливові кліматичних факторів), розрахунок напружено-деформованого стану конструкції, міцнісні та деформаційні властивості матеріалу конструкції.

2. Розроблено математичну модель оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. При цьому застосовано алгоритм, що включає виконання таких етапів: вибір апарату формалізації, побудова зовнішнього опису, перевірка працездатності моделі, побудова внутрішнього стану, перевірка працездатності та ідентифікація параметрів. Сформульовані початкові та граничні умови при побудові зазначених моделей, які дозволяють з достатньою для інженерних розрахунків точністю прогнозувати вогнестійкість вогнезахисної залізобетонної конструкції. Особливістю розроблених моделей є врахування теплофізичних характеристик залізобетонних конструкцій та вогнезахисних покриттів, особливостей формування режимів пожежі, міцнісних та деформаційних властивостей матеріалів при впливі пожежі.

3. Розроблено комп'ютерну модель напружено-деформованого стану вогнезахисного багатопустотного залізобетонного перекриття в програмному комплексі «ЛІРА-САПР». В моделі враховано нелінійні закони деформування матеріалів моделі, а саме: експоненціальний та кусково-лінійний, які враховують модуль пружності бетону, коефіцієнт лінійної температурної деформації бетону, граничну відносну деформацію бетону, які дозволяють з достатньою для інженерних розрахунків точністю (до 5 %) оцінювати вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій.

4. Проведено оцінювання вогнестійкості вогнезахисного багатопустотного залізобетонного перекриття за допомогою розробленої комп'ютерної моделі напружено-деформованого стану. Проведено оцінку точності (5 %) розробленої комп'ютерної для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій за допомогою розробленої математичної моделі та розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій.

### Література

1. Отрош Ю. А. Розробка підходу до визначення технічного стану будівельних конструкцій при дії силових та високотемпературних впливів. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. О.: ОДАБА, 2018. Вип. 71. С. 54–60. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/8399>

2. Отрош Ю. А., Рубан А. В., Гапонова А. С., Морозова Д. М. Підхід для визначення технічного стану залізобетонних конструкцій при силових і високотемпературних впливах. Проблеми пожежної безпеки: зб. наук. пр.. Харків, 2019. Вип. 46. С. 148–154. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/13532>

3. Xu Q., Han C., Wang Y.C., Li X., Chen L., Liu Q. Experimental and numerical construction and civil engineering. DOI: 10.52363/2524-0226-2022-36-9

investigations of fire resistance of continuous high strength steel reinforced concrete T-beams. *Fire Safety Journal*. 2015. 78. P. 142–154. URL: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2015.09.001>

4. Rafika, Saudagar Ashpak, Hashmi A. K. Review on Fire Resistance of Reinforced Concrete Column. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2021. Vol. 8. Is. 4. P. 1881–1887. URL: <https://www.irjet.net/archives/V8/i4/IRJET-V8I4354.pdf>

5. 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>

6. Zheng W., Hou X., Wang Y. Progress and prospect of fire resistance of reinforced concrete and prestressed concrete structures. *J. Harbin Inst. Technol.* 2016. 48. P. 1–18. doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.12.001

7. Ibrahimbegovic A., Boulkertous A., Davenne L., Muhasilovic M., Pokrklic A. On modeling of fire resistance tests on concrete and reinforced-concrete structures. *Computers and concrete*. 2010. 7(4). P. 285–301. doi: <https://doi.org/10.12989/cac.2010.7.4.285>

8. Tamrazyan A. G., Mineev M. S., Urasheva A. Fire Resistance of Reinforced Concrete Corrosion-Damaged Columns of the "Standard" Fire. In *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 828. P. 163–169. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.828.163

9. Cvetkovska M., Knezevic M., Xu Q., Chifliganec C., Lazarevska M., Gavriloska A. T. Fire scenario influence on fire resistance of reinforced concrete frame structure. *Procedia engineering*. 2018. 211. P. 28–35. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.134>

10. 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

11. Zheng Y. Q., Zhuang J. P. Analysis on fire resistance of reinforced concrete Wall. In *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 243. P. 797–800. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.243-249.797>

12. 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.* URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/9243>

13. 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>

*Y. Otrosh, DSc, Professor, Head of the Department*

*A. Kovalov, PhD, Senior Researcher, Doctoral Student*

*R. Purdenko, Adjunct*

*N. Rashkevich, PhD, Lecturer of the Department*

*R. Maiboroda, Lecturer of the Department*

*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkov, Ukraine*

## **FIRE RESISTANCE OF FIREPROOF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES TO INCREASE THE FIRE SAFETY LEVEL OF FACILITIES**

A structural and logical scheme was developed, which describes the provision of fire resistance of fire-resistant reinforced concrete structures based on the proposed mathematical model and the calculation-experimental method of evaluating the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete structures. A mathematical model for evaluating the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete structures was developed, which consists of the following stages: selection of the formalization apparatus, construction of the external description, verification of the model's operability, construction of the internal state, verification of operability, and identification of parameters. Initial and boundary conditions were formulated during the construction of the specified models, which allow predicting the fire resistance of the fire-resistant reinforced concrete structure with sufficient accuracy for engineering calculations. A computer model of the stress-strain state of a fire-resistant multi-hollow reinforced concrete floor was developed in the "LIRA-SAPR" software in order to increase the level of fire safety of buildings and structures. A static calculation of the fire-resistant reinforced concrete multi-hollow floor slab was carried out, as a result of which the stress-deformed state of the floor was obtained under the combined action of force and temperature loads. The results of numerical modeling were compared with the results of an experimental study of fire resistance. The accuracy of the developed computer model for evaluating the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete structures was checked. Non-linear laws of deformation of the model materials were established, namely: exponential and piecewise linear, which take into account the modulus of elasticity of concrete, the coefficient of linear thermal deformation of concrete, the ultimate relative deformation of concrete, which allow with sufficient accuracy for engineering calculations (up to 5 %) to estimate the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete structures.

**Keywords:** fire resistance, fire-resistant reinforced concrete structures, fire resistance assessment, numerical modeling, fire protection, fire-resistant coating, LIRA-SAPR

## References

- Otrosh, Yu. A. (2018). Rozrobka pidkholu do vyznachennya tekhnichnoho stanu budivel'nykh konstruktsiy pry diyi sylovykh ta vysokotemperaturnykh vplyviv. *Visnyk Odes'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury*, 71, 54–60. Retrieve from <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/8399>
- Otrosh, Yu. A., Ruban, A. V., Haponova, A. S., Morozova, D. M. (2019). Pidkhid dlya vyznachennya tekhnichnoho stanu zalizobetonnykh konstruktsiy pry sylovykh i vysokotemperaturnykh vplyvakh. *Problemy pozhezhnoyi bezpeky*, 46, 148–154. Retrieve from <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/13532>
- Xu, Q., Han, C., Wang, Y. C., Li, X., Chen, L., & Liu, Q. (2015). Experimental and numerical investigations of fire resistance of continuous high strength steel reinforced concrete T-beams. *Fire Safety Journal*, 78, 142–154. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2015.09.001>
- Rafika, Saudagar Ashpak and Hashmi, A. K. (2021). Review on Fire Resistance of Reinforced Concrete Column. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 8, 4, 1881–1887. Retrieve from <https://www.irjet.net/archives/V8/i4/IRJET-V8I4354.pdf>
- de Souza, R. C. S., Andreini, M., La Mendola, S., Zehfuß, J., & Knaust, C. (2019). Probabilistic thermo-mechanical finite element analysis for the fire resistance of reinforced concrete structures. *Fire Safety Journal*, 104, 22–33. Retrieve from <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.12.005>
- Zheng, W., Hou, X., & Wang, Y. (2016). Progress and prospect of fire resistance of reinforced concrete and prestressed concrete structures. *J. Harbin Inst. Technol.*, 48, 1–18. doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.12.001
- Ibrahimbegovic, A., Boulkertous, A., Davenne, L., Muhasilovic, M., & Pokrklic, A. (2010). On modeling of fire resistance tests on concrete and reinforced-concrete structures. *Computers and concrete*, 7(4), 285–301. doi:

<https://doi.org/10.12989/cac.2010.7.4.285>

8. Tamrazyan, A. G., Mineev, M. S., & Urasheva, A. (2020). Fire Resistance of Reinforced Concrete Corrosion-Damaged Columns of the "Standard" Fire. In *Key Engineering Materials*, 828, 163–169. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.828.163

9. Cvetkovska, M., Knezevic, M., Xu, Q., Chifliganec, C., Lazarevska, M., & Gavriloska, A. T. (2018). Fire scenario influence on fire resistance of reinforced concrete frame structure. *Procedia engineering*, 211, 28–35. Retrieve from <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.134>

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

11. Zheng, Y. Q., & Zhuang, J. P. (2011). Analysis on fire resistance of reinforced concrete Wall. In *Advanced Materials Research*, 243, 797–800. Retrieve from <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.243-249.797>

12. Koval'ov, A. I., Otrosh, Yu. A., Danilin, O. M. (2019). Eksperymental'ni doslidzhennya vohnestiykosti zalizobetonnykh perekryttiv z systemoyu vohnezhakhystu. *Problemy pozhezhnoyi bezpeky: zb. nauk. pr.*, 45, 73–78. Retrieve from <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/9243>

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

Надійшла до редколегії: 20.10.2022

Прийнята до друку: 16.11.2022