

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

КОВАЛЬОВ АНДРІЙ ІВАНОВИЧ



УДК 614.841.343

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ОЦІНЮВАННЯ
ВОГНЕСТІЙКОСТІ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

21.06.02 – пожежна безпека

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2023

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті цивільного захисту України (м. Харків).

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
ОТРОШ Юрій Анатолійович,
Національний університет цивільного захисту
України (м. Харків),
начальник кафедри пожежної профілактики
в населених пунктах.

Опоненти: доктор технічних наук, професор
НІЖНИК Вадим Васильович,
Інститут державного управління та
наукових досліджень з цивільного
захисту (м. Київ),
начальник науково-дослідного центру
протипожежного захисту;

доктор технічних наук, професор
СУР'ЯНІНОВ Микола Георгійович,
Одеська державна академія будівництва та
архітектури (м. Одеса),
завідувач кафедри будівельної механіки;

доктор технічних наук, професор
ДАНЧЕНКО Юлія Михайлівна,
Національна академія національної гвардії
України (м. Харків),
професор кафедри фундаментальних дисциплін.

Захист відбудеться «20» березня 2024 року о 12-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.707.04 в Національному університеті цивільного захисту України Державної служби України з надзвичайних ситуацій за адресою: 61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету цивільного захисту України за адресою: 61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94, а також на сайті спеціалізованої вченої ради Д 64.707.04 за електронною адресою: <https://nuczu.edu.ua/ukr/nauka/spetsializovani-vcheni-rady?view=article&id=366&catid=50>.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої
ради Д 64.707.04



В.Ю. Колосков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. В умовах глобалізації та збільшення загроз для людини перше місце відіграє саме збереження стійкості будівель та споруд в умовах пожеж, а також збереження їх функціонального призначення після таких впливів. Згідно з статистичними даними за останні десять років встановлено, що кожного року в середньому виникало 80 тисяч пожеж, при цьому кількість пожеж в будівлях та спорудах різного функціонального призначення складала 30 тис. (40 % від загальної кількості). А кількість зруйнованих чи пошкоджених будівель і споруд становила близько 25 тисяч (83 % від кількості пожеж в будівлях). Така негативна статистика вказує на те, що одним з факторів, на якому ґрунтується пожежна безпека під час проєктування, будівництва та експлуатації будівель та споруд різного функціонального призначення є забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій. Вимоги стійкості будівель та споруд забезпечуються комплексом заходів, що передбачаються як технологією виконання будівельних конструкцій, так і застосуванням вогнезахисних покриттів. Одним із шляхів підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій є застосування ефективних вогнезахисних покриттів із обґрунтованими параметрами для забезпечення необхідного рівня вогнестійкості, що сприятиме підвищенню пожежної безпеки будівель та споруд.

Дослідженнями щодо експериментального та розрахункового оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій шляхом застосування вогнезахисних покриттів займалися такі вчені: А.С. Беліков, М.М. Гивлюд, О.І. Голоднов, В.М. Жартовський, С.В. Жартовський, О.О. Кіреєв, П.Г. Круковський, С.В. Поздєєв, В.М. Ройтман, М.М. Семерак, М.Г. Сур'янінов, С.Л. Фомін, Т.М. Шналь, Çirpici, B. K., Lucherini, A., De Silva D., Imran, M., J. Jiang, Li G.-Q., O. Pettersson, Q. Xu, L.J. Segerlind, Y.C. Wang. При цьому поза увагою залишилися питання обґрунтування найбільш значущих чинників впливу вогнезахисних властивостей покриттів як підґрунтя для розвитку наукових основ підвищення рівня забезпечення пожежної безпеки об'єктів (в частині забезпечення достатнього рівня вогнестійкості конструкцій) шляхом застосування вогнезахисних покриттів з обґрунтованими параметрами та умовами експлуатації при проєктуванні та будівництві нових об'єктів.

Пошукам шляхів забезпечення ефективності вогнезахисних покриттів для залізобетонних конструкцій при впливі найбільш значущих параметрів та умов експлуатації вогнезахисних покриттів були присвячені дослідження, які висвітлені в роботах: В.А. Андропова, Л.М. Вахітової, Ю.М. Данченко, В.М. Жартовського, В.В. Коваленка, П.Г. Круковського, Т.А. Кузнецова, С.В. Новака, Ю.А. Отроша, С.В. Поздєєва, М.М. Семерака, О.П. Якименко, J. K. Paik, G. Richard, L. Zárate, Q.Q. Zhang. У згаданих роботах основна увага приділялась в основному питанням підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій, у той час, як питання щодо обґрунтування параметрів вогнезахисних покриттів вогнезахисних будівельних конструкцій після впливу на них найбільш значущих чинників задля забезпечення вогнестійкості вогнезахисних

залізобетонних будівельних конструкцій, досліджувались в меншій мірі або взагалі не розглядались.

Отже, стан порушеного питання характеризується *протиріччями*:

– *на практиці*:

а) з одного боку існує велика кількість розрахункових та експериментальних методів оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій;

б) з іншого боку, відсутні дані щодо найбільш значущих чинників, що дозволять розробити розрахунково-експериментальні методи оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів;

– *в теорії*:

а) з одного боку, наявне підґрунтя щодо розкриття впливу різних чинників на забезпечення вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій об'єктів під час проектування, будівництва та експлуатації будівель і споруд;

б) з іншого боку, відсутні науково обґрунтовані підходи щодо комплексного врахування найбільш значущих чинників впливу вогнезахисних властивостей покриттів в системі «будівельна конструкція – вогнезахисне покриття» для подальшого використання в розрахунково-експериментальних методах оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій.

Наведені протиріччя вказують на актуальність вирішення наукової проблеми у сфері пожежної безпеки, що полягає в недосконалості методів оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій, шляхом розробки і реалізації розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій з обґрунтованими параметрами та умовами експлуатації вогнезахисних покриттів.

Отже, подальший розвиток наукових основ забезпечення вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних несучих будівельних конструкцій є перспективним напрямом підвищення рівня пожежної безпеки об'єктів шляхом застосування під час проектування, будівництва та експлуатації будівель і споруд ефективних вогнезахисних покриттів вогнезахисних залізобетонних несучих будівельних конструкцій з обґрунтованими параметрами та умовами експлуатації вогнезахисних покриттів.

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

Дисертаційну роботу виконано відповідно до Державної цільової соціальної програми забезпечення пожежної безпеки на 2011–2015 роки (розпорядження Кабінету Міністрів України від 29.12.2010 №2348-р), а також у рамках науково-дослідних робіт, що виконувалися в Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України: «Розрахунково-експериментальний метод визначення характеристик вогнестійкості будівельних конструкцій, обладнання і вогнезахисних покриттів» (ДР № 0113U001473 від 15.02.2013), в якій здобувач був виконавцем (термін виконання 2013–2014 роки), «Визначення довговічності вогнезахисних покриттів металевих конструкцій, що спучуються» (ДР № 0115U000978), в якій здобувач був відповідальним виконавцем (термін виконання 2015–2016 роки), науково-дослідної роботи, що виконувалася в Національному

університеті цивільного захисту України: «Прогнозування залишкового ресурсу будівельних конструкцій після силових, деформаційних і високотемпературних впливів» (ДР № 0119U001003), в якій здобувач був виконавцем (термін виконання 2019–2023 роки).

Мета і завдання дослідження. *Метою роботи є розвиток наукових основ забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій шляхом розроблення розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій, будівель та споруд при сумісному високотемпературному та силовому впливах як передумови підвищення рівня забезпечення пожежної безпеки об'єктів шляхом їх вогнезахисту з обґрунтованими параметрами та умовами експлуатації.*

Для досягнення поставленої мети потребували вирішення наступні **наукові завдання:**

- проаналізувати сучасні методи та підходи щодо забезпечення та оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій. Виявити шляхи підвищення рівня забезпечення пожежної безпеки об'єктів під час проєктування, будівництва та експлуатації будівель і споруд;

- розробити математичну модель та розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій;

- перевірити достовірність розроблених математичної моделі та розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій;

- розробити методологічну базу для оцінювання та прогнозування вогнестійкості будівель із вогнезахищених будівельних конструкцій шляхом побудови моделей теплового та напружено-деформованого стану будівлі з таких конструкцій;

- розробити рекомендації щодо впровадження розробленого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій;

- розрахувати економічний ефект від впровадження розробленого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій.

Об'єкт дослідження – процес оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій об'єктів під час проєктування, будівництва та експлуатації будівель і споруд з використанням ефективних вогнезахисних покриттів.

Предмет дослідження – вплив найбільш значущих параметрів на ефективність оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій об'єктів під час проєктування, будівництва та експлуатації будівель і споруд.

Методи досліджень. Під час виконання дисертаційної роботи використано: комплексний аналіз раніше отриманих результатів щодо питань оцінювання та забезпечення вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних несучих будівельних конструкцій; наукове узагальнення та систематизація, аналіз вимог нормативних документів, методи експериментального дослідження поведінки зразків при нагріванні, числові методи скінчених елементів, скінчених різниць, а також

напружено-деформованого стану в елементах будівельних конструкцій в умовах нагріву під час пожежі у числовій реалізації за методом скінчених елементів; експериментальні методи досліджень будівельних конструкцій при різних впливах, які базуються на передових методах досліджень конструкцій при випробуваннях із залученням сучасних приладів і обладнання; математичне та комп'ютерне моделювання процесів нестационарного теплообміну між факелом пожежі та будівельними конструкціями шляхом використання методу нестационарної теплопровідності; розв'язання прямих і обернених задач теплопровідності; метод «збурення» за допомогою генератора випадкових чисел; методи математичного моделювання процесів експлуатації, що дозволяють моделювати різні впливи, яким можуть бути піддані реальні конструкції; для обробки експериментальних даних та верифікації результатів теоретичних досліджень були застосовані методи математичної статистики, метод планування експерименту.

Наукова новизна отриманих результатів.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження полягає у розвитку наукових основ оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій, будівель та споруд при сумісному високотемпературному та силовому впливах, які враховують особливості впливу товщини вогнезахисного покриття, теплофізичних характеристик залізобетонних конструкцій та вогнезахисного покриття, механічних властивостей будівельної конструкції, режиму пожежі, кліматичних факторів на ефективність процесу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій. При цьому *уперше*:

1. Розроблено математичну модель для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій, яка дозволяє враховувати теплофізичні характеристики залізобетонних конструкцій та вогнезахисних покриттів, особливості режимів пожежі, механічні властивості матеріалів за високих температур, нелінійність законів деформування матеріалів конструкції та оцінювати вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій у граничних станах за ознакою втрати несучої та/або теплоізолювальної здатності.

2. Розроблено розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій на основі використання експериментальних та розрахункових процедур, який відрізняється від наявних ідентифікацією теплофізичних характеристик моделі на основі розв'язання обернених задач теплопровідності за даними випробувань на вогнестійкість, визначенням мінімальної товщини вогнезахисного покриття за результатами випробувань на вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій за різних умов випробувань та значеннях чинників впливу.

3. Розроблено методологічну базу для оцінювання вогнестійкості будівель із вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій шляхом побудови моделей теплового та напружено-деформованого стану будівлі, що відрізняються від тих, що існують, врахуванням наявності та властивостей вогнезахисних покриттів, високотемпературних, силових та кліматичних впливів, сумісної роботи будівельних конструкцій всієї будівлі та дозволяють оцінити вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій, конструктивної системи чи її частини та рівень пожежної безпеки об'єкта в

частині забезпечення вогнестійкості і прийняти ефективні рішення щодо підвищення вогнестійкості конструкцій.

Удосконалено:

4. Експериментальні та методичні підходи щодо оцінювання вогнестійкості та підвищення рівня забезпечення пожежної безпеки об'єктів, що відрізняються застосуванням розробленого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій в частині додаткового врахування найбільш значущих параметрів впливу вогнезахисних властивостей покриттів в системі «будівельна конструкція – вогнезахисне покриття».

Набули подальшого розвитку:

5. Уявлення про засади забезпечення рівня пожежної безпеки будівель та споруд різного призначення із залізобетонних несучих будівельних конструкцій у частині обґрунтування необхідності оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій при різних режимах пожежі та інших впливах з урахуванням специфіки завдань забезпечення рівня пожежної безпеки об'єктів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості реалізації та впровадженні результатів роботи на об'єктах різного призначення під час їх будівництва, розширення, реконструкції, технічного переоснащення, капітального ремонту, зміни функціонального призначення, а також на об'єктах, що експлуатуються при оцінюванні та забезпеченні вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій.

Результати дисертаційної роботи використані при розробці та впровадженні двох державних стандартів України:

- ДСТУ-Н Б В.1.2-17:2016 «Настанова щодо науково-технічного моніторингу будівель і споруд»;
- ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 «Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість» (акт впровадження ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» від 08.04.2019 р. № 100-582).

Розроблені методи апробовані та впроваджені у діяльність ТОВ «ЛІРА САПР» для розрахункового оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій (довідка про впровадження № 49 від 07.03.2023 р.), ГУ ДСНС України в Одеській області (акт впровадження від 19.01.2023 р.) під час оцінювання вогнестійкості вогнезахисних конструкцій на складі продукції ТОВ «Дельта-Вільмар Україна» (м. Южне) та зливно-наливної естакаді ПАТ «Одеснафтопродукт» (м. Одеса), в процесі надання послуг у сфері будівництва ТОВ «ІПК «Спецзахист» (акт впровадження від 10.01.2023р.), для розрахунку меж вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій Запорізької, Рівненської, Хмельницької та Південноукраїнської атомних електростанцій, під час проектування будівель та споруд приватним підприємством «ПроектБудСтар» (акт впровадження від 25.11.2022 р.) при будівництві багатоквартирного житлового будинку по вул. Сумгаїтській, 15, в місті Черкасах (розрахунок залізобетонних перекриттів та колон на вогнестійкість). Результати роботи використані приватним науково-виробничим підприємством «Прометей-Сервіс» (м. Черкаси), приватним підприємством «ПОЖЗАХИСТ-2020»

(м. Хмельницький), страховою компанією «Уніка» (м. Київ) в процесі розроблення проектів проведення робіт з вогнезахисту та оцінювання прийняттого ризику збудованих об'єктів (листи-підтримки).

Теоретичні, технологічні та методологічні положення роботи використані в освітньому процесі кафедри пожежної профілактики в населених пунктах Національного університету цивільного захисту України (акт впровадження від 01.12.2022 р.) для підготовки здобувачів вищої освіти за першим (бакалаврським) та другим (магістерським) рівнями вищої освіти в галузі знань 26 «Цивільна безпека» зі спеціальностей 261 «Пожежна безпека» та 263 «Цивільна безпека» під час викладання навчальних дисциплін «Стійкість будівель та споруд при пожежі» (модуль 4, тема «Розрахунок межі вогнестійкості збірної багатопустотної плити за ознакою втрати несучої спроможності»), «Будівлі і споруди та їх поведінка в умовах пожежі» (модуль 1, тема «Визначення межі вогнестійкості металевих конструктивних елементів»), «Інноваційні інженерно-технічні заходи пожежної безпеки» (модуль 1, тема «Система забезпечення пожежної безпеки об'єктів»). Також результати впроваджено в освітній процес факультету технологій, будівництва та раціонального природокористування Черкаського державного технологічного університету (акт впровадження від 05.12.2023 р.) для підготовки здобувачів вищої освіти за першим (бакалаврським) та другим (магістерським) рівнями вищої освіти в галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» зі спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» при виконанні курсових і дипломних проектів, під час викладання лекцій, проведення лабораторних та практичних занять з навчальних дисциплін «Металеві конструкції», «Будівельні конструкції (залізобетонні)», «Залізобетонні та армокам'яні конструкції», «Модернізація, реконструкція та ремонтно-відновлювальні роботи в будівництві», «Випробування та обстеження споруд».

Результати роботи втілено в розробку 6 патентів України на корисну модель щодо способу визначення температури втрати несучої здатності будівельних конструкцій та межі вогнестійкості будівельної конструкції, а також фактичної межі вогнестійкості конструкцій експлуатованих будівель та споруд.

Особистий внесок здобувача полягає в участі у формулюванні наукової проблеми у сфері пожежної безпеки, наукових положень, самостійному визначенні мети і завдань дослідження, об'єкту та предмету дослідження, аналізі вітчизняних та закордонних досліджень, розробці теоретичних розділів дисертації, удосконаленні та розробленні методів і методик досліджень, проведенні експериментальних досліджень, а також в обробці результатів, формулюванні висновків. Дисертація є самостійною роботою автора. Експериментальні дослідження та впровадження результатів досліджень виконані спільно зі співавторами публікацій. Всі положення, винесені на захист, та результати приведені в роботах [1–66].

В наукових роботах, що опубліковані у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в наступному. В [1] здобувачем проведено аналіз сучасного стану забезпечення вогнестійкості та стану питання щодо оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій, розроблено розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій, проведено перевірку достовірності

розробленого методу. В [2] проведено моделювання нестационарного прогріву вогнезахисного залізобетонного перекриття за допомогою розробленої скінчено-елементної моделі в програмному середовищі «ЛІРА-САПР», проведено оцінку точності розробленої моделі. В [3] досліджено вплив кліматичних факторів на властивості реактивного вогнезахисного покриття. В [4] розроблено методику оцінювання вогнестійкості залізобетонних колон, в частині визначення питомої теплоємності та коефіцієнту теплопровідності зразків бетону, які зазнали впливу кліматичних чинників. В [5] проведено апробацію методики дослідження впливу кліматичних факторів на вогнезахисну здатність реактивних вогнезахисних покриттів. В [7] досліджено вплив випадкових похибок у вимірюванні температур на точність визначення теплофізичних характеристик покриття. В [8] розроблено та апробовано методику оцінки вогнезахисної здатності покриттів після впливу кліматичних факторів. В [9] проведено оцінювання вогнестійкості залізобетонних перекриттів захищених мінеральною ватою. В [10] проведено моделювання нестационарного прогріву вогнезахисної пластини в програмному комплексі «ANSYS» з найбільш значущими параметрами. В [11] проведено оцінювання вогнезахисної здатності реактивних покриттів, виконано порівняння результатів моделювання з експериментальними даними. В [12] проведено аналіз чутливості температури в точках вимірювання температури до параметрів моделі теплового стану залізобетонного перекриття. В [13] взято участь в розробці розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних будівельних конструкцій. В [14] проведено перевірку адекватності розробленого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості. В [15] розроблено скінчено-елементну модель оцінювання вогнестійкості вогнезахисних конструкцій. В [16] проведено оцінювання вогнезахисної здатності розроблених вогнезахисних композицій розрахунково-експериментальним методом. В [17] розроблено модель вогнезахисного багатопустотного залізобетонного перекриття в програмному комплексі «ANSYS» та проведено моделювання нестационарного прогріву. В [18] розроблено структурно-логічну схему забезпечення вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій, математичну модель оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій, комп'ютерну модель напружено-деформованого стану вогнезахисного багатопустотного залізобетонного перекриття в програмному комплексі «ЛІРА-САПР». В [19] проведено моделювання теплового стану балки, проведено оцінку точності розробленої моделі та порівняння результатів експерименту з розрахунковими даними. В [20] розроблена комп'ютерна модель вогнезахисної залізобетонної колони в програмному середовищі «ЛІРА-САПР» для моделювання нестационарного прогріву в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі, перевірено точність розробленої моделі. В [21] проведено моделювання нестационарного прогріву конструкції, перевірено працездатність розробленої скінченно-елементної моделі. В [22] розроблено методологічну базу для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій шляхом побудови моделі теплового та напружено-деформованого стану будівлі паркінга. В [23] досліджено вплив помилок у вимірюванні температур на похибку визначення параметрів штукатурного вогнезахисного покриття для захисту залізобетонних перекриттів. В [24] досліджено

вогнестійкість монолітних залізобетонних перекриттів розрахунково-експериментальним методом. В [26] досліджено особливості процесів теплообміну в порожнинах багатопустотних залізобетонних перекриттів за допомогою комп'ютерних моделей. В [29] визначено основні проблеми і труднощі при оцінюванні вогнестійкості при різних температурних режимах пожежі. В [30] проведено вогневі випробування вогнезахисних пластин при температурному режимові вуглеводневої пожежі, визначено теплофізичні характеристики та характеристику вогнезахисної здатності утвореного покриття. В [31] розроблено методику попередньої оцінки вогнезахисної здатності покриттів в умовах вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі. В [34] виокремлено перелік проблем, що мають місце при визначенні вогнезахисної здатності покриттів після їх кліматичних випробувань. В [35] проведено вогневі випробування масштабованих вогнезахисних зразків, визначено теплофізичні характеристики та характеристику вогнезахисної здатності досліджуваного покриття. В [36] визначено вплив кількості і розміщення термопар з необігрівної поверхні вогнезахисної пластини на точність визначення вогнезахисних властивостей покриття. В [37] проведено оцінювання вогнестійкості вогнезахисного залізобетонного перекриття розрахунково-експериментальним методом. В [38] досліджено вплив вогнезахисного покриття на вогнестійкість. В [39] проведено дослідження теплового стану і вогнестійкості залізобетонного перекриття та розрахункове визначення межі вогнестійкості. В [40] проведено аналіз випробувань на вогнестійкість вогнезахисного залізобетонного перекриття. В [41] досліджено вплив температурних режимів пожежі на вогнезахисну здатність пасивних покриттів залізобетонних перекриттів. В [42] проведено експериментальне визначення температури з необігрівної поверхні масштабованих вогнезахисних зразків в умовах вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі. В [43] розроблено та перевірено достовірність моделі для оцінювання вогнестійкості вогнезахисної багатопустотної плити перекриття. В [44] виокремлено перелік проблем при визначенні вогнезахисної здатності покриттів в умовах впливу вуглеводневої пожежі. В [45, 46] досліджено вплив температурного режиму вуглеводневої пожежі. В [47] поставлено завдання дослідження строку придатності вогнезахисних покриттів. В [48] досліджено особливості впливу температурного режиму вуглеводневої пожежі. В [49, 52] поставлені завдання визначення характеристик вогнезахисних покриттів. В [50] досліджено вплив кліматичних факторів на властивості вогнезахисних покриттів. В [51] досліджено вплив кількості і місць розташування термопар на точність визначення параметрів вогнезахисних покриттів. В [53] визначено параметри реактивного вогнезахисного покриття після впливу кліматичних факторів. В [54] розроблено методику оцінювання вогнезахисної здатності покриттів після впливу кліматичних факторів. В [55] проведені вогневі випробування зразків зменшених розмірів з нанесеною вогнезахисною речовиною при тепловій дії стандартного температурного режиму пожежі. В [56] розроблена чисельна модель нестационарного прогріву системи «вогнезахисна пластина – вогнезахисне покриття». В [57] розроблено модель для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій. В [58] запропоновано вирішення проблеми забезпечення вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних

колон. В [60] розроблено пристрій для визначення адгезійної міцності вогнезахисного покриття. В [61–65] взято участь в розробці способів визначення температури втрати несучої здатності будівельної конструкції, фактичної межі вогнестійкості будівельних конструкцій експлуатованих будівель та споруд, визначення несучої здатності вібронавантаженої будівельної конструкції. В [66] розроблено методику визначення характеристики вогнезахисної здатності покриттів залізобетонних конструкцій.

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати дисертаційного дослідження доповідались, обговорювались та отримали позитивне схвалення на: IV Міжнародній науково-практичній конференції «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2014); Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2014, 2017); 17-ій Всеукраїнській науково-практичній конференції рятувальників (м. Київ, 2015); Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2015, 2016); Міжнародній науково-практичній конференції «Прикладні аспекти техногенно-екологічної безпеки» (м. Харків, 2015); Міжнародній науково-практичній конференції «Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації» (м. Львів, 2016); XVIII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering, production engineering and physics» (Częstochowa, 2017); Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (Одеса, 2018, 2022); 8-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (м. Харків, 2019); міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій» (м. Харків, 2020, 2021); міжнародній науково-методичній конференції «Проблеми пожежної безпеки 2022 («Fire Safety Issues 2022»))» (м. Харків, 2022).

Публікації. Основні положення й наукові результати дисертації викладено в 66 наукових роботах, з яких: 1 монографія, проіндексована у базі даних Scopus; 2 статті у періодичних виданнях України, включених до категорії «А»; 19 статей у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз; 12 статей у наукових фахових виданнях України; 2 статті наукових періодичних виданнях інших держав; 7 статей у закордонних виданнях, проіндексованих у базі даних Scopus; 1 стаття, яка додатково відображає наукові результати дисертації; 6 патентів на корисну модель; 1 авторське свідоцтво на твір; 15 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Дисертація містить 325 сторінок друкованого тексту (з них 249 сторінок основної частини дисертації), 113 рисунків, 19 таблиць, 265 найменувань використаних джерел, 12 додатків на 41-ій сторінці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, мету, об'єкт, предмет та основні завдання дослідження, наукову новизну, наукові положення і практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про впровадження та апробацію результатів дослідження.

У першому розділі «Сучасний стан забезпечення вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій та методів оцінювання» проаналізований сучасний стан забезпечення пожежної безпеки будівель та споруд різного призначення, в результаті якого виявлені протиріччя, що виникають в процесі аналізу умов забезпечення вогнестійкості незахищених та вогнезахищених будівельних конструкцій. Розв'язання цих протиріч створює умови для безпечної експлуатації будівель та споруд з використанням вогнезахищених залізобетонних конструкцій з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів. На підставі аналізу встановлено, що 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 об'єктів різного призначення застосовувати будівельні конструкції, які здатні забезпечити будівлям чи спорудам стійкість у разі високотемпературного впливу або у випадку руйнування внаслідок порушення нормальних умов функціонування об'єкта.

Проведено аналіз надзвичайних ситуацій та пожеж, в результаті якого встановлено, що велика кількість надзвичайних ситуацій, зокрема внаслідок пожеж, відбувається через нехтування або неврахування під час проектування вимог пожежної безпеки щодо вогнестійкості будівельних конструкцій, в тому числі і вогнезахищених. Відтак зроблено висновок, що одним із пріоритетних напрямків забезпечення вогнестійкості будівель та споруд є використання вогнезахищених будівельних конструкцій з використанням вогнезахисних покриттів з обґрунтованими параметрами та умовами експлуатації. Проаналізовані переваги та недоліки методів оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій. Аналіз дав змогу констатувати тенденцію поширення застосування розрахунково-експериментальних методів для оцінювання меж вогнестійкості вогнезахищених будівельних конструкцій та потребу у розробленні розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій.

На підставі використаних результатів аналізу щодо стану проблеми сформульовано мету, визначено завдання та методи дослідження, обґрунтовано методологію та методики виконання теоретичних та експериментальних досліджень.

У другому розділі «Розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій» розроблено математичну модель та на її основі розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій.

Двовимірною математичною моделлю являла собою систему рівнянь:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (1)$$

рівняння руху повітря в порожнині за умови вільної конвекції:

$$\rho \left(\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) = \rho g - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \cdot \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \cdot \frac{\partial V_x}{\partial y} \right); \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \cdot \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \cdot \frac{\partial V_y}{\partial y} \right), \quad (3)$$

рівняння нерозривності для повітря в порожнині:

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} = 0, \quad (4)$$

рівняння стану стискання газу для повітря в порожнині:

$$PV = \frac{m}{M} RT, \quad (5)$$

рівняння радіаційного теплообміну між стінками порожнини перекриття з повітрям, прозорим для радіаційних променів (крайова умова другого роду):

$$\left. \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \right|_L = \frac{q_r}{\lambda}, \quad (6)$$

водночас радіаційно-конвективний теплообмін з необігрівної поверхні перекриття дорівнює:

$$\alpha_{\text{фТС}} = 20 + 0,19 \cdot T + 0,029 \cdot C + 0,0082 \cdot \varphi \cdot T - 0,0025 \cdot \varphi \cdot C - 0,0005 \cdot T \cdot C - 0,001 \cdot \varphi^2 - 0,001 \cdot T^2 + 0,0015 \cdot C^2 \quad (7)$$

У формулі (7) $\alpha_{\text{фТС}}$, Вт/м²·°С – вперше емпірично виведений коефіцієнт теплообміну між необігрівною поверхнею та повітрям навколишнього середовища з урахуванням відносної вологості φ , %, температури T , °С, та концентрації твердих домішок в повітрі C , мг/м³.

Умови симетрії (відсутності теплообміну) на бічних гранях періодичної частини розглянутої залізобетонної плити (рис. 1)

$$\frac{\partial T(0, y, t)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T(a, y, t)}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

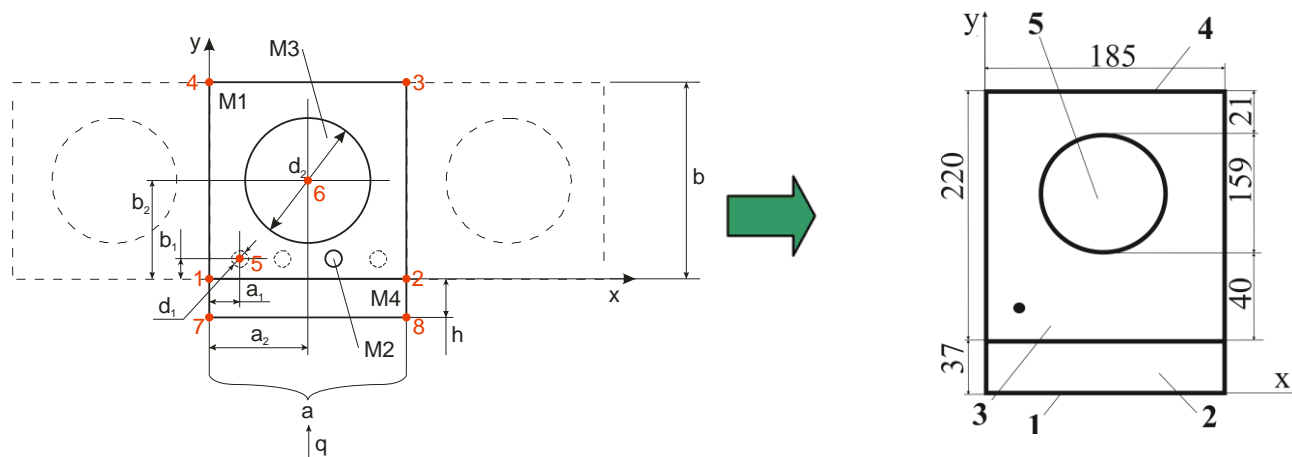


Рис. 1. Схема періодичної частини залізобетонного перекриття для моделювання: 1 – поверхня нагрівання в печі; 2 – штукатурка; 3 – бетон; 4 – необігрівна поверхня; 5 – порожнина; M1 – бетон; M2 – арматура; M3 – повітря; M4 – штукатурне покриття; a – товщина періодичної частини, $a=0,185$ м

В (1) – (8): t – час, с; V_x , V_y – компоненти швидкості по x та y , м/с; m/M – кількість речовини, моль; ρ – густина, кг/м³; C_p – питома теплоємність,

Дж/(кг·°С); μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с; q_r – питомий радіаційний потік на поверхні порожнини, Вт/м²; $d\phi$ – зміна кутового коефіцієнта; σ – стала Стефана-Больцмана, $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); V – об'єм повітря в порожнині, м³; P – тиск повітря в порожнині, Па; g – прискорення вільного падіння, м/с²; R – універсальна газова стала, 8,31 Дж/(моль·К), \vec{n} – нормальний вектор до поверхні; T – температура, °С; λ – коефіцієнт теплопровідності залізобетону, Вт/(м·°С); L – межа порожнини.

Неоднорідність (бетон, повітря в порожнинах, вогнезахисне покриття) у розглянутій моделі враховано залежностями C_v (питома об'ємна теплоємність в Дж/(м³·°С)), ρ і λ від координат x і y .

Система диференціальних рівнянь механічної рівноваги:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} + X = 0, \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} + Y = 0, \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + Z = 0 \end{cases} \quad (9)$$

де σ_{xx} , σ_{xy} , σ_{xz} – напруження на елементі поверхні $dy \cdot dz$;

σ_{yx} , σ_{yy} , σ_{yz} – напруження на елементі поверхні $dz \cdot dx$;

σ_{zx} , σ_{zy} , σ_{zz} – напруження на елементі поверхні $dx \cdot dy$;

X , Y , Z – складові вектора об'ємної сили, що належать до одиниці об'єму.

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

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, & \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, & \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \\ 2\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y}, & 2\varepsilon_{yz} = \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z}, & 2\varepsilon_{zx} = \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}, \end{cases} \quad (10)$$

Якщо в конструкції температура змінюється на величину T , то елемент довжини ds буде мати нову довжину $(1+\alpha T)ds$ за умови, що окремі елементи об'єму не зустрічають перешкоди в процесі розширення а, отже, не виникають температурні напруження внаслідок того, що частинки конструкції перешкоджають взаємним змінам об'єму. Внаслідок цього виникають температурні напруження, що зумовлюють додаткові подовження та здвиги згідно з формулами класичної теорії пружності:

$$\sigma_{ik} (I, k=x, y, z), \quad (11)$$

де σ_{ik} – тензор напружень, Па; I – одиничний тензор в дев'яторному просторі k .

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

$$\varepsilon_{ik} = \frac{1}{2G} \left[\sigma_{ik} - \frac{\mu}{1+\mu} s \delta_{ik} \right] + \alpha T \delta_{ik}, \quad (12)$$

де G – модуль здвигу, Па; δ_{ik} – одиничний тензор напружень, Па; s – девіатор напружень (викликає зміну форми тіла); μ – базисна (координатна, апроксимуюча) функція; α – температурний коефіцієнт напруження; T – зміна температури, °С.

Математична модель термонапруженого стану (9) – (12) також інтегрується за допомогою чисельного методу скінчених елементів.

Модель (9) – (12) розглядається у формі переміщень, тобто для випадків, коли шуканою роздільною функцією служить переміщення. Така постановка аналізу термонапруженого стану залізобетонних конструкцій була обрана з міркувань того, що нелінійна залежність між напруженнями та деформаціями має прояв вже на ранніх стадіях деформацій, тобто:

$$a(u, v) = e(v) = 0, \quad (13)$$

де дійсне переміщення u та будь-яке можливе переміщення v визначені на ділянці Ω і належать енергетичному простору V . Для нелінійного статичного завдання функціонал $a(u, v)$ не є лінійним за першим аргументом і передбачається безперервним.

Використано можливість моделювання біматеріальних скінчених елементів (залізобетон) із завданням двох різних законів деформування. Під час розв'язання систем нелінійних рівнянь пошук розв'язання здійснено розв'язком рекурентної послідовності лінійних рівнянь.

Нелінійні властивості основного та армувального матеріалів задані за допомогою експоненційних залежностей. Арматурні включення для об'ємних елементів задані як відсоток армування.

Вираз потенційної енергії для тривимірного напруженого стану має вигляд:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \varepsilon^T \sigma d\Omega = \frac{1}{2} \int_{\Omega} (Bu)^T D \cdot (Bu) d\Omega, \quad (14)$$

де u – вектор переміщень; ε – вектор деформацій; σ – вектор напруг; B – матриця диференціювання; D – матриця пружності, $u^T = (u_x, u_y, u_z)$; $\varepsilon^T = (\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz})$; $\sigma^T = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz})$.

Відповідно до моделі фізичних процесів, що відбуваються в системі «залізобетонна конструкція – вогнезахисне покриття», та математичної моделі розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій є способом аналізу, оптимізації та прогнозування досліджуваних процесів тепломасообміну у вогнезахисених залізобетонних конструкціях на основі комп'ютерної чисельної (розрахункової) моделі, адекватність якої забезпечено шляхом параметричної або структурної ідентифікації за допомогою експериментальної інформації про досліджуваний процес і розв'язання обернених задач теплопровідності. Основою методу є

математична (розрахункова, чисельна) модель досліджуваного фізичного процесу, а експеримент (експериментальні дані) є допоміжною складовою, необхідною для забезпечення адекватності обраної моделі.

Основними складовими розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій є:

1. Розрахункова (комп'ютерна реалізація розробленої математичної моделі) модель фізичного процесу.

2. Експериментальні дані, необхідні для забезпечення адекватності моделі процесу.

3. Ідентифікація параметрів обраної моделі процесу з метою забезпечення її адекватності.

4. Адекватна модель, яка в подальшому буде використана для вирішення поставлених завдань аналізу, оптимізації або прогнозування досліджуваного фізичного процесу.

У підсумку розрахунково-експериментальний метод має компоненти, представлені на рис. 2.

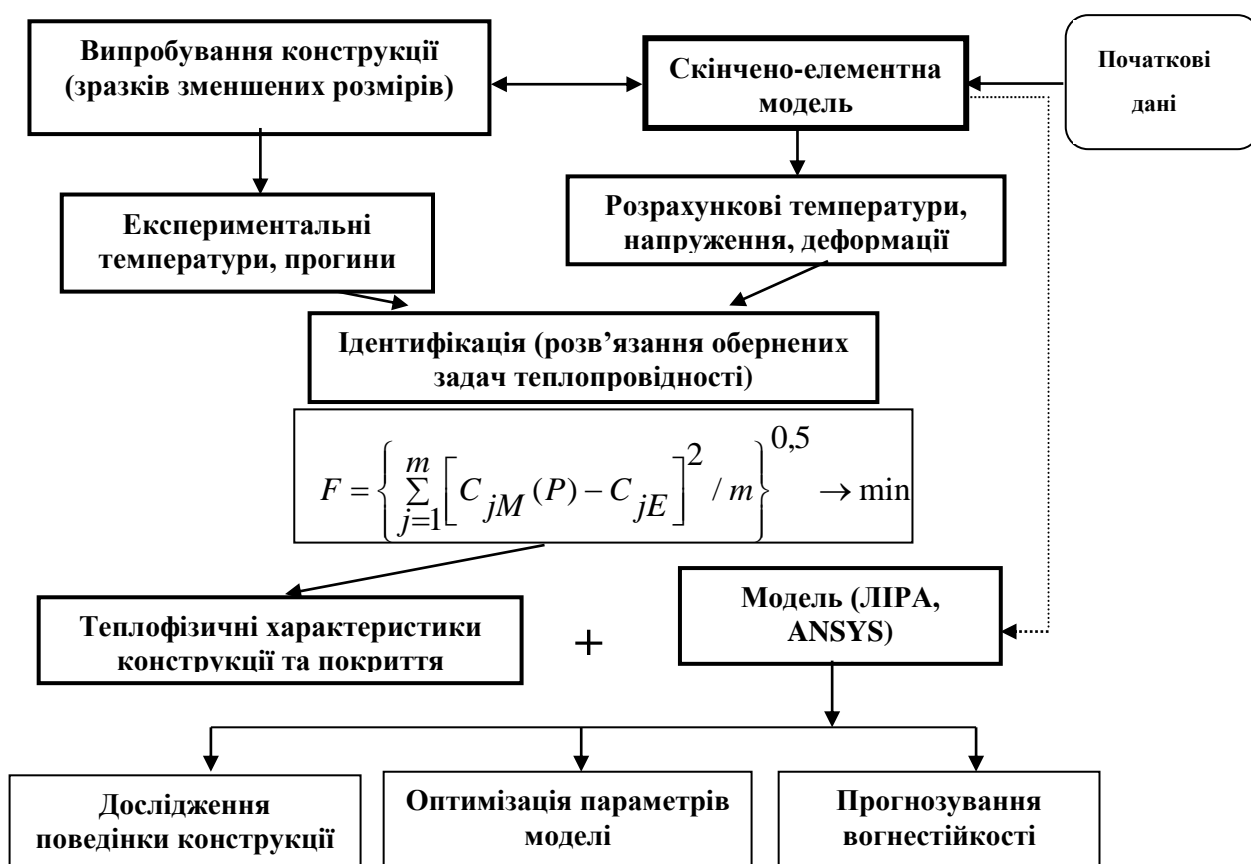


Рис. 2. Схема розрахунково-експериментального методу

Розглянуто алгоритм застосування запропонованого методу, надано опис процедур його реалізації. Перевірено працездатність запропонованого методу у випадку виявлення взаємозв'язку між параметрами пасивного вогнезахисного штукатурного покриття та вогнестійкістю вогнезахисеного багатопустотного залізобетонного перекриття. Описано основні складові розрахунково-експериментального методу: виконання випробувань на вогнестійкість (експериментальна частина РЕМ), вибір математичної та комп'ютерної моделей фізичних процесів, які відбуваються в об'єктах, що досліджують, а також вибір

процедур визначення параметрів моделі шляхом розв'язання обернених задач і визначення характеристики вогнезахисної здатності покриттів залізобетонних перекриттів шляхом розв'язання низки прямих задач (розрахункова частина РЕМ). Виконана робота щодо обґрунтування параметрів досліджуваного пасивного вогнезахисного штукатурного покриття шляхом виявлення взаємозв'язку між параметрами вогнезахисного штукатурного покриття (теплофізичні характеристики, коефіцієнти тепловіддачі з обігрівної та необігрівної поверхонь, товщина покриття) та вогнестійкості багатопустотного залізобетонного перекриття як наукового підґрунтя для їхнього застосування в будівництві з урахуванням вимог пожежної безпеки за допомогою розрахунково-експериментального методу. Процедуру розроблення методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій запропоновано розглянути на прикладі багатопустотної залізобетонної плити перекриття як найбільш складної конструкції з точки зору геометрії, існування пустот, в яких відбувається складний конвективно-радіаційний теплообмін, та арматури, яку також потрібно враховувати для визначення несучої здатності плити перекриття. Для цього були використані результати випробувань на вогнестійкість двох багатопустотних залізобетонних плит перекриття ПК 48-12-8т розмірами 4780×1190 мм, товщиною 220 мм. На зразки знизу та з боків плит за допомогою штукатурного агрегату наносили шар речовини із вогнезахисного покриття (штукатурки) середньою загальною товщиною 25,5 мм. Результати вимірювань температур у вогневій печі наведені на рис. 3, а, а з необігрівної поверхні залізобетонної плити перекриття – на рис. 3, б.

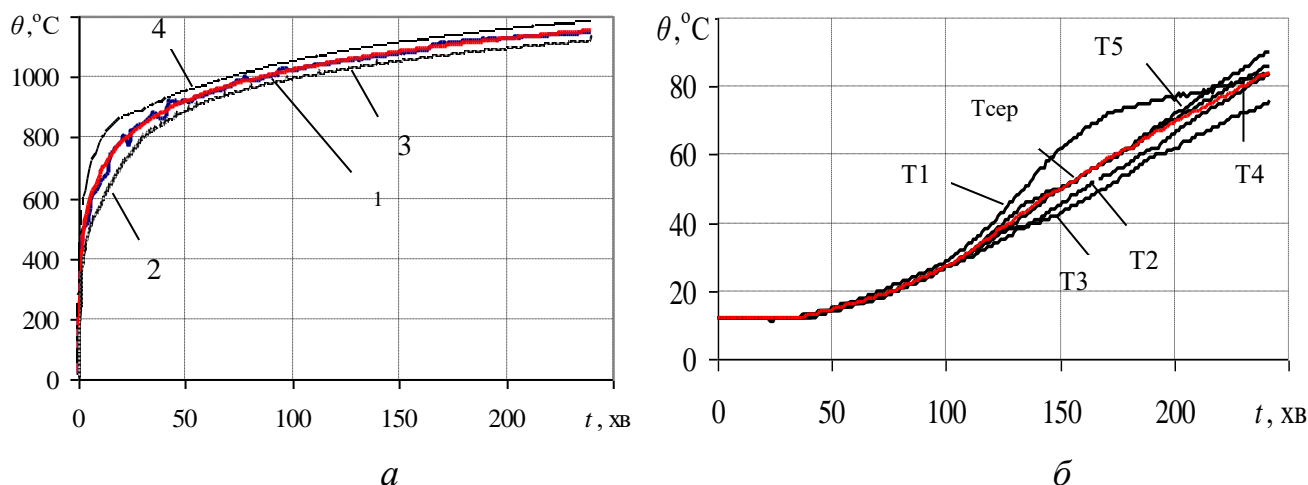


Рис. 3. Залежність температури в печі від часу вогневого впливу з обігрівної поверхні вогнезахисного залізобетонного перекриття товщиною 220 мм (а) та залежність температури від часу вогневого впливу з необігрівної поверхні вогнезахисного залізобетонного перекриття в різних місцях вимірювання температури (б)

Дані, отримані в результаті випробувань на вогнестійкість (рис. 3), в подальшому використовували для знаходження теплофізичних характеристик покриття, що досліджувалось (рис. 4, б), використовуючи для цього розроблену математичну модель теплового стану залізобетонного перекриття з розбивкою на 6 шарів, яка є рівнянням теплопровідності з урахуванням променистого теплообміну і граничними умовами III-го роду на поверхні, що обігрівається, і граничними умовами III-го роду з необігрівної поверхні.

Для визначення необхідної товщини досліджуваного вогнезахисного покриття залізобетонних конструкцій спочатку були знайдені ТФХ бетону (рис. 4, а) перекриття, а потім вогнезахисного покриття методом розв'язання обернених задач теплопровідності (ОЗТ) в програмному середовищі FRIEND.

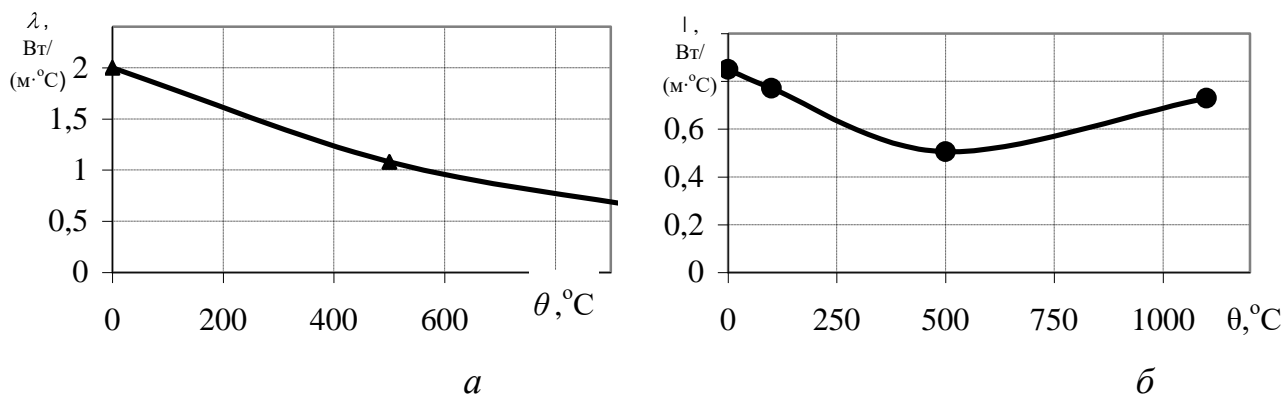


Рис. 4. Залежності коефіцієнта теплопровідності бетону залізобетонного багатопустотного перекриття від температури (а) та ефективного коефіцієнта теплопровідності штукатурного покриття від температури (б), отримані в результаті розв'язання ОЗТ за даними випробувань на вогнестійкість

Як видно з рис. 4, б, в діапазоні температур від 0 °С до приблизно 500 °С значення коефіцієнта теплопровідності досліджуваного штукатурного покриття лінійно падає і проходить через мінімальне значення 0,5 Вт/м·°С (за температури 500 °С), що можна пояснити зниженням густини і збільшенням пористості покриття за рахунок видалення хімічнозв'язаної вологи. Зростання коефіцієнта теплопровідності в діапазоні температур від 500 °С до 1100 °С, можна пояснити появою радіаційної складової в порах покриття в поєднанні з його високотемпературною усадкою. В процесі знаходження ТФХ покриття задавали питому об'ємну теплоємність штукатурного покриття постійною і рівною $C_v = 1 \cdot 10^6$ Дж/м³·К, а коефіцієнт теплопровідності розраховували як функцію від температури (рис. 4, б). ТФХ шарів бетону використовували знайдені раніше, а відхилення розрахункових від експериментальних температур склало 1 °С.

Для оцінювання та прогнозування вогнестійкості багато-пустотних залізобетонних перекриттів з вогнезахисними покриттями та без них необхідно знати, яка товщина вогнезахисного штукатурного покриття забезпечує нормовану межу вогнестійкості перекриття. Для цього використано характеристики, знайдені вище: ТФХ бетону, штукатурного покриття.

На основі розробленого методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій розв'язанням серії прямих задач теплопровідності, була знайдена залежність товщини вогнезахисного

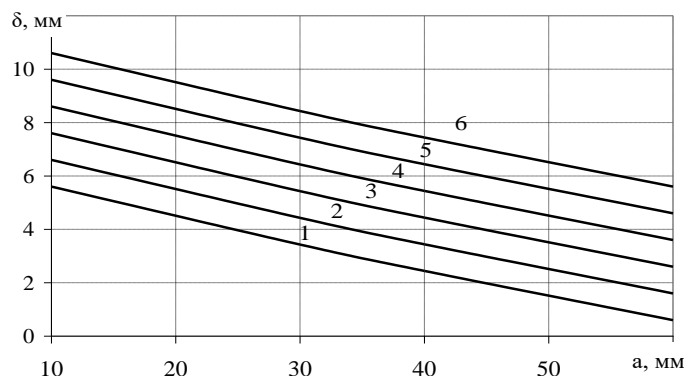


Рис. 5. Залежність товщини (δ) вогнезахисного покриття від товщини захисного шару бетону залізобетонного перекриття (a) за критерієм досягнення критичної температури арматури (500 °С) для межі вогнестійкості: 1 – 60 хв; 2 – 90 хв; 3 – 120 хв; 4 – 150 хв; 5 – 180 хв; 6 – 240 хв

покриття від товщини захисного шару бетону для нормованих значень меж вогнестійкості вогнезахисного багатопустотного залізобетонного перекриття (рис. 5).

Для врахування впливу кліматичних факторів на вогнезахисну здатність вогнезахисних покриттів запропоновано застосувати методика, зміст якої полягає у визначенні вогнезахисної ефективності вогнезахисних покриттів, що зазнали впливу кліматичних факторів з подальшим їх порівнянням з відповідними значеннями вогнезахисних покриттів, що не зазнали подібного впливу. Визначення строку придатності вогнезахисних покриттів запропоновано виконувати в 2 етапи. На першому етапі необхідно отримати зістарені зразки вогнезахисних покриттів, на другому – визначити залишкову вогнезахисну здатність такого покриття та порівняти її з нормативними значеннями для встановлення її ефективності. Для отримання зістарених зразків вогнезахисних покриттів використовуються дві методики, а саме: методика натурних випробувань вогнезахисних покриттів (старіння відбувається під дією природного середовища) та методика прогнозування терміну придатності вогнезахисного покриття за результатами пришвидшених кліматичних випробувань, які виконують в спеціальних (кліматичних) камерах. Суть пришвидшених кліматичних випробувань полягає в циклічному впливі річної кількості кліматичних факторів заданого регіону в кліматичній камері. За різними методиками різна кількість циклів пришвидшених кліматичних випробувань відповідає 1 року реального впливу кліматичних факторів.

Для цього було підготовлено 4 вогнезахисні пластини розмірами $500 \times 500 \times 5$ мм з нанесеною на одну поверхню пластини вогнезахисною речовиною. На обігрівну поверхню пластини перед нанесенням вогнезахисної речовини був нанесений шар ґрунту ГФ-021, товщиною 0,065 мм. Визначення параметрів вогнезахисного покриття після впливу на нього кліматичних факторів виконували в два етапи. На першому етапі було виконано пришвидшене штучне старіння вогнезахисних пластин в кліматичній камері BINDER KBF 240. Другий етап полягав у вогневих випробуваннях вогнезахисних пластин після витримки у кліматичній камері і порівняння даних з контрольними зразками.

Кліматична камера BINDER KBF 240 дозволяє проводити дослідження в температурному діапазоні $-10 - +60$ °C і вологості від 0 до 90 %. (рис. 6).



Рис. 6. Загальний вигляд кліматичної камери BINDER KBF 240

Згідно з вибраною методикою пришвидшеного старіння було обрано режим, який відповідає приміщенню, яке не опалюється:

- 1) температура (40 ± 2) °С, відносна вологість (90 ± 3) % протягом 6 год.;
- 2) температура (20 ± 2) °С, відносна вологість (90 ± 3) % протягом 2 год.;
- 3) температура мінус (15 ± 3) °С, відносна вологість не більше 80 % протягом 3 год.;
- 4) температура (60 ± 2) °С, відносна вологість не більше 80 % протягом 7 год.;
- 5) температура (20 ± 2) °С, відносна вологість не більше 80 % протягом 6 год.

Вісім повторень такого циклу відповідає 1 року служби вогнезахисного покриття в реальних умовах. В результаті процедури пришвидшеного старіння отримано зразки, які зістарені на 1 та 3 роки відповідно.

В процесі пришвидшеного старіння спостерігалось незначне «вимивання» вогнезахисного покриття з поверхні пластини, що досліджувалась, проте видимих змін під час візуального огляду не виявлено.

Наступним етапом було проведення вогневих випробувань вогнезахисних пластин після витримки у кліматичній камері і порівняння даних з контрольними зразками. Для вимірювання температури з необігрівної поверхні вогнезахисної пластини було встановлено 3 термопари типу ТХА (рис. 7) з діаметром дроту 0,5 мм (Т1–Т3), одна термопара (Т2) у центрі зразка та дві (Т1, Т3) на відстані 100 мм від країв пластини. Спаї термопар зачеканені в пластину на глибину 2 мм та прикріплені теплоізолювальним матеріалом.



Рис. 7. Схема розміщення термопар з необігрівної поверхні пластини перед випробуванням

Суть випробування полягала у створенні температурного режиму в печі, наближеного до стандартного температурного режиму пожежі за рахунок спалювання рідкого пального (рис. 14). Температура з необігрівної поверхні в процесі випробувань за 17 хвилин досягла критичної температури для вогнезахисної пластини.

Досягнення обраної критичної температури на необігрівній поверхні контрольних пластин та пластин із зістареним вогнезахисним покриттям відбулося майже одночасно. Ці результати збігаються з даними, наданими виробником вогнезахисної речовини про її строк придатності, що свідчить про адекватність запропонованої методики визначення строку придатності вогнезахисних покриттів будівельних конструкцій.

В результаті проведених досліджень встановлено, що кліматичний вплив, який дорівнює 3-ом рокам експлуатації, не впливає на теплофізичні характеристики досліджуваного покриття, а отже не впливає і на вогнезахисну

здатність. Перевагою застосування методу для масштабованих зразків є можливість визначення параметрів вогнезахисних покриттів за значно менший час, ніж натурні кліматичні випробування в режимі реального часу.

У третьому розділі «Перевірка достовірності розроблених математичної моделі та розрахунково-експериментального методу» перевірено достовірність розроблених математичної моделі та розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій, використовуючи аналіз чутливості параметрів математичної моделі на вихідний результат та обчислювальний експеримент. Проведено аналіз похибок у вимірюванні температури на точність визначення параметрів вогнезахисного покриття. Досліджено вплив температурних режимів пожежі на точність методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій.

Достовірність розрахунку теплового режиму залізобетонних конструкцій як з вогнезахисними покриттями, так і без них, значною мірою визначається точністю задавання параметрів математичної моделі, що забезпечує її адекватність реальним процесам теплообміну під час випробувань на вогнестійкість.

Серед параметрів моделі необхідно ідентифікувати ті, які є невідомими або недостатньо відомими і найбільш впливають на розрахункові значення температур обраної математичної моделі. Під ідентифікованістю параметрів розуміють процедуру, яка показує, по-перше, принципову можливість знаходження параметрів за допомогою розв'язання обернених задач і, по-друге, якщо їх знаходять, то з якою похибкою. Обернені задачі забезпечують знаходження таких значень параметрів моделі, які дають близькість експериментальних і розрахункових значень температур в точках вимірювання досліджуваних вогнезахисних залізобетонних конструкцій. Процес визначення ступеня впливу параметрів моделі на вихідний результат (в нашому випадку температури) називають аналізом чутливості.

Як коефіцієнт чутливості (15) вибрано відношення величини середньоквадратичного відхилення температур до відносного значення зміни аналізованого параметра моделі P_i :

$$F_i = \frac{\Phi}{\Delta P_i / P_i}, \quad (15)$$

де Φ – середньоквадратичне відхилення температур в часі; ΔP_i – величина відхилення i -го параметра відносно його значення P_i .

Методика аналізу чутливості полягає в послідовному збуренні параметрів моделі, ідентифікації теплофізичних характеристик і розв'язанні серії прямих задач теплопровідності для отримання значень середньоквадратичного відхилення температури в часі і безпосередньому розрахунку коефіцієнтів чутливості F (рис. 8).



Рис. 8. Найбільш значущі (вагомі) параметри моделі теплопровідності вогнезахисної залізобетонної конструкції

Ці результати дозволили визначити перелік параметрів математичної моделі, які необхідно розраховувати за допомогою обернених задач теплопровідності за даними випробувань на вогнестійкість з достатньою точністю: коефіцієнт теплопровідності λ штукатурного покриття і питома об'ємна теплоємність бетону C_V шарів 1, 3, 5.

Важливим аспектом при дослідженні вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій крім визначення теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів є також правильність і точність визначення цих характеристик з урахуванням можливих похибок під час вимірювання температур з необігрівної поверхні залізобетонного багатопустотного перекриття. Не врахування або нехтування можливими похибками у вимірюванні температур може призвести до недостовірного визначення теплофізичних характеристик покриттів, а в подальшому – і до неправильного визначення вогнестійкості залізобетонних конструкцій захищених вогнезахисними покриттями, що негативним чином вплине на основні показники пожежної статистики.

Під час проведення випробувань на вогнестійкість виникають похибки вимірювань, які враховують в обчислювальному експерименті шляхом введення в значення температур, отриманих за показниками 5-ти термопар, помилок випадкового характеру, що відповідають рівню реальних помилок вимірювань. Для вимірювання температур використовували термопари ТХА з максимальною невизначеністю вимірювання за температури від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $334\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а за температури від $334\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $2,5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,0075 \cdot T_{\text{вим.}}$ (максимальна $12,25\text{ }^{\circ}\text{C}$). Інструментальна похибка вимірювально-реєструючого комплексу становила $\pm(0,5+0,0009T)$ за температури $0\text{--}1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (максимальна $1,67\text{ }^{\circ}\text{C}$). В сумі це дорівнює відхиленню температур в $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, що дорівнює похибці 10% . Тому, для дослідження впливу похибок на точність визначення ТФХ покриттів, а в

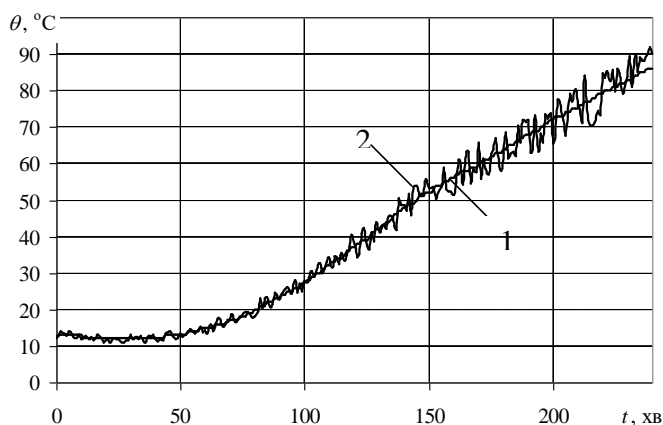


Рис. 9. Точні і збурені до 10 % значення температур з необігрівної поверхні вогнезахисного залізобетонного перекриття: 1 – точна крива; 2 – крива, збурена на 10 %

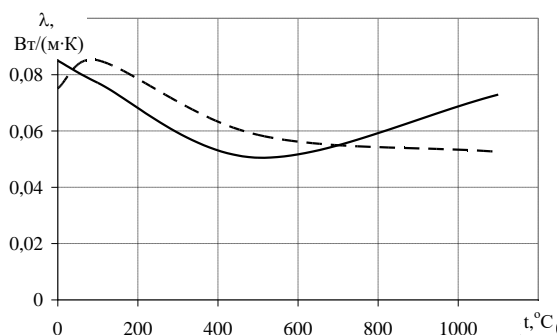


Рис. 10. Залежність ефективного коефіцієнту теплопровідності досліджуваного штукатурного покриття від температури: суцільна лінія – точні коефіцієнти; пунктирна лінія – збурені на 10%

припустити, що такі відхилення обумовлені конструктивним виконанням багатопустотних плит перекриттів у поєднанні з особливостями масопереносу вологи (хімічно зв'язаної води) за умови високотемпературного впливу.

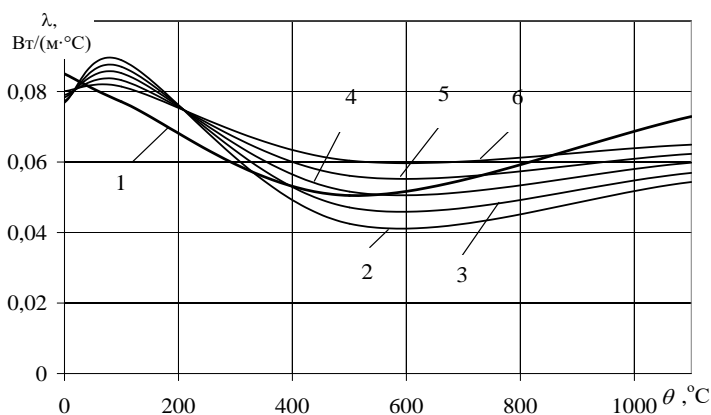


Рис. 11. Залежність ефективного коефіцієнта теплопровідності штукатурного покриття від температури, знайденого розв'язанням обернених задач теплопровідності за даними випробувань на вогнестійкість: 1 – при α_{c2} , що залежить від температури; 2 – $\alpha_{c2}=3$ Вт/(м²·°C); 3 – $\alpha_{c2}=4$ Вт/(м²·°C); 4 – $\alpha_{c2}=5$ Вт/(м²·°C); 5 – $\alpha_{c2}=6$ Вт/(м²·°C); 6 – $\alpha_{c2}=7$ Вт/(м²·°C)

подальшому і вогнезахисну здатність покриттів використали обчислювальний експеримент, що імітує випробування на вогнестійкість, в результаті якого були отримані розрахункові значення температур на необігрівній поверхні багатопустотного залізобетонного перекриття (рис. 9).

Далі за збуреними на 10 % температурам з необігрівної поверхні перекриття з покриттям, розв'язанням оберненої задачі теплопровідності, знаходили теплофізичні характеристики досліджуваного штукатурного покриття (рис. 10).

Як видно із рис. 10, випадкові похибки у вимірюванні температур з необігрівної поверхні вогнезахисного перекриття, впливають на точність визначення теплофізичних характеристик покриття, що досліджувалось (максимальна похибка до 30 %). Можливо

Нарівні з основними параметрами (коефіцієнт теплопровідності штукатурного покриття і питома об'ємна теплоємність), що впливають на точність визначення теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття, є коефіцієнт тепловіддачі α_{c2} від бетонної необігрівної поверхні плити перекриття в навколишнє середовище. Вплив коефіцієнта тепловіддачі α_{c2} показано на рис. 11.

Як видно з рис. 11, із збільшенням коефіцієнта тепловіддачі з необігрівної поверхні залізобетонного перекриття з покриттям, похибка визначення коефіцієнта теплопровідності зменшується. Також встановлено, що цьому коефіцієнту потрібно приділяти особливу увагу, і найбільш правильний шлях – це задавати його таким, що залежить від температури (рис.11, крива 1).

Досліджено вплив температурних режимів пожежі (стандартного, вуглеводневої пожежі, тунельної кривої за стандартами Нідерландів (RWS)) на мінімальну товщину вогнезахисного покриття. Розв'язанням серії ПЗТ, на основі математичної моделі теплового стану залізобетонного перекриття, були отримані товщини вогнезахисного штукатурного покриття для нормованої межі вогнестійкості перекриття 180 хв (табл. 1).

Таблиця 1

Значення мінімальної товщини досліджуваного штукатурного покриття для забезпечення нормованої межі вогнестійкості перекриття 180 хв

Товщина захисного шару бетону багатопустотного залізобетонного перекриття, мм	Мінімальна товщина вогнезахисного покриття, мм		
	Стандартний температурний режим	Режим вуглеводневої пожежі	Режим тунельної пожежі за стандартами Нідерландів (RWS)
10	15,5	17,3	20
30	10,98	12,7	15,1
40	8,85	10,55	12,7
60	4,73	6,3	8,1

За результатами дослідження встановлено, що максимальні значення мінімальної товщини покриття від 8,1 до 20 мм притаманні для температурного режиму пожежі за стандартами Нідерландів (RWS), а мінімальні значення від 4,73 до 15,5 мм – для стандартного температурного режиму.

В результаті встановлено, що різниця між значеннями мінімально необхідної товщини досліджуваного вогнезахисного покриття для стандартного температурного режиму та температурного режиму вуглеводневої пожежі становить близько 12 %, а різниця між значеннями необхідної товщини досліджуваного вогнезахисного покриття для стандартного температурного режиму та температурного режиму за стандартами Нідерландів (RWS) – 29 %. Таким чином, розроблений розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій дозволяє з достатньою для інженерних розрахунків точністю (до 10 %) оцінювати вогнестійкість вогнезахисених залізобетонних конструкцій. Запропонований метод дозволяє враховувати конструктивні особливості залізобетонних конструкцій, температурні режими пожеж, за яких випробовують конструкції, теплофізичні характеристики бетону, арматурних стрижнів залізобетонних конструкцій, теплофізичні характеристики вогнезахисних покриттів, мінімальну товщину вогнезахисного покриття для забезпечення нормованих значень межі вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій.

У четвертому розділі «Розробка методологічної бази для оцінювання та прогнозування вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій» запропоновано алгоритм та процедуру реалізації розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисених

залізобетонних конструкцій, що містить тепловий аналіз конструкцій, математичне моделювання конструкцій методом скінчених елементів, визначення зусиль і деформацій в конструкціях, порівняння характеру деформацій реального об'єкта 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 (рис. 12).

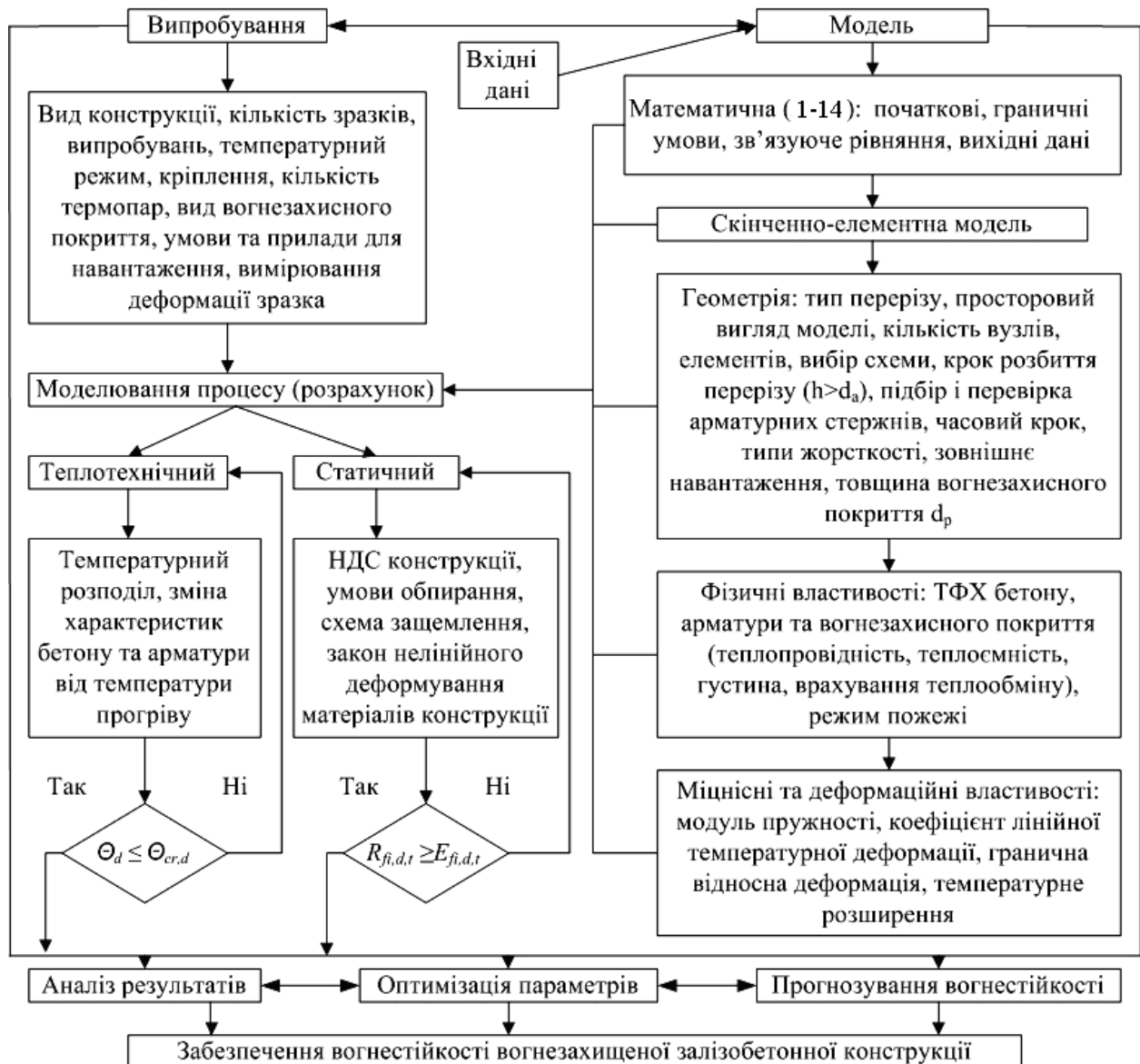


Рис. 12. Керуючий алгоритм та процедура реалізації розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій

Для перевірки ефективності розробленого методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій побудована модель у програмному комплексі «ANSYS». Для цього були використані результати випробувань на вогнестійкість двох багатопустотних залізобетонних плит перекриття ПК 48-12-8 розмірами 4780×1190 мм та товщиною 220 мм (рис. 13).

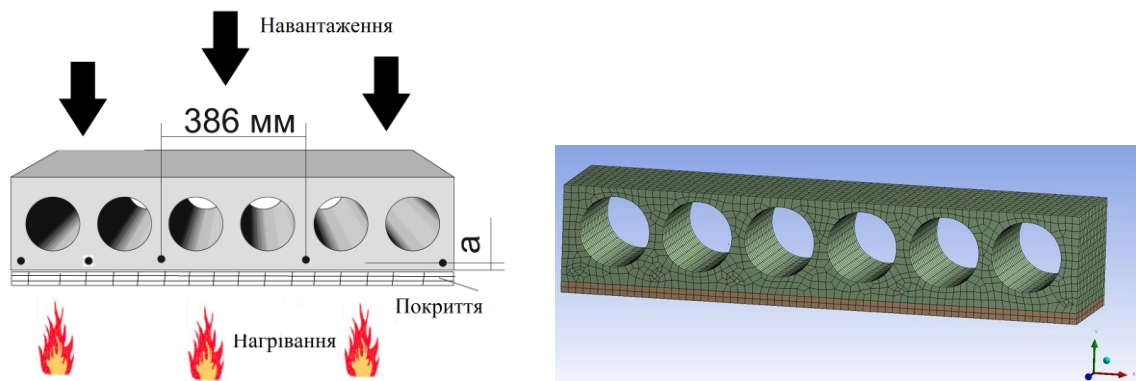


Рис. 13. Скінчено-елементна модель вогнезахищеного багатопустотного залізобетонного перекриття в 3D постановці

Проектування вогнезахищеної залізобетонної плити перекриття виконувалось у модулі Design Modeller програми «ANSYS» з подальшим теплотехнічним розрахунком у модулі TRANSIENT THERMAL. Комп'ютерна модель вогнезахищеної залізобетонної плити перекриття, розроблена в програмному комплексі «ANSYS», містить такі типи скінчених елементів: SOLID186, CONTA174, TARGE170.

В результаті чисельного моделювання, розв'язанням прямих задач теплопровідності були отримані розподіли температур у вогнезахищеному багатопустотному залізобетонному перекритті. На рис. 14 показано температурний розподіл вогнезахищеного перекриття на 60 та 240 хвилині вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі.

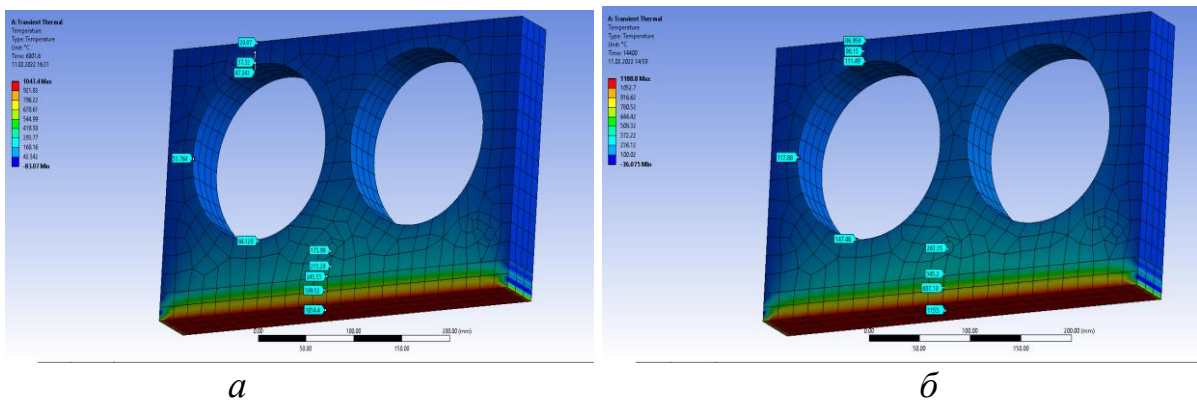


Рис. 14. Розподіл температур у фрагменті вогнезахищеної залізобетонної плити перекриття на 60 (а) та 240 (б) хвилині її випробування за стандартного температурного режиму пожежі

Особливий акцент під час вивчення полів температур, зображених на рис. 4.7, слід звернути на прогрівання порожнин багатопустотного залізобетонного перекриття. Правильність задавання теплофізичних та механічних характеристик саме цього шару найбільше впливає на точність моделювання. Необхідно зазначити, що для знаходження еквівалентного коефіцієнта теплопровідності шару з порожнинами існує декілька підходів. Перший підхід базується на задаванні в порожнинах повітря з його характеристиками. У разі другого підходу 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 розраховують окремо.

Підтвердженням адекватності розробленої моделі є дані рис. 15, на якому видно задовільну збіжність експериментальних та розрахункових температур.

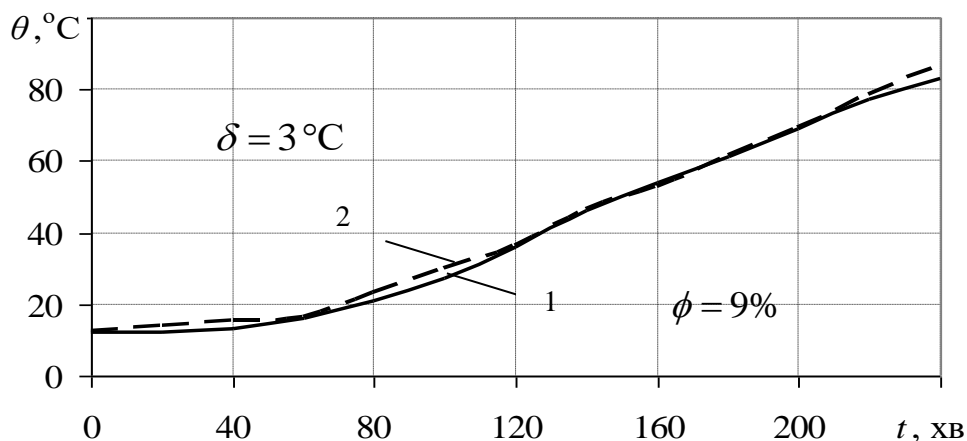


Рис. 15. Залежність температури від часу вогневого впливу з необігрівної поверхні залізобетонного вогнезахищеного перекриття: 1 – експериментальна температура; 2 – розрахована в ANSYS

Отримані розрахункові дані не розходяться з експериментальними (рис. 15, крива 1), оскільки розрахункова крива (рис. 15, крива 2) зміни температури від часу вогневого впливу з необігрівної поверхні вогнезахищеного перекриття добре корелює з експериментальною. Це в свою чергу свідчить про задовільну адекватність розробленої 3D-моделі для теплотехнічного розрахунку теплового стану вогнезахищеного залізобетонного перекриття і про правильність розробленої моделі, чого неможливо досягнути, використовуючи інші підходи у разі задавання теплообміну в порожнинах перекриття. Підходи, що базуються на задаванні в порожнинах повітря з його характеристиками та відсутністю конвективного і радіаційного теплообміну, призводять до великих похибок в обчисленні (до 50 %).

Використовуючи результати випробувань на вогнестійкість, виконали чисельне моделювання прогрівання вогнезахищеної багатопустотної плити перекриття в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» (ліцензія № 1/8583 від 16.02.2022).

Алгоритм розрахунку являв собою систему рівнянь визначення температури у кожному вузлі координатної сітки, яку накладають на переріз. Координатну сітку накладають так, щоб її вузли розташовувалися не тільки в товщині перерізу, але і по його периметру. Також вузли необхідно розміщувати у центрі стержнів для конструкцій з гнучкою арматурою і по довжині полиць та стінки в середині їхньої товщини для конструкцій з жорсткою арматурою. Крок сітки рекомендовано задавати в межах 0,01–0,03 м, але обов'язково він повинен бути більшим за максимальний діаметр робочої арматури.

Було змодельовано поперечний переріз вогнезахищеної конструкції в 15-ій ознаці схеми (рис. 16).

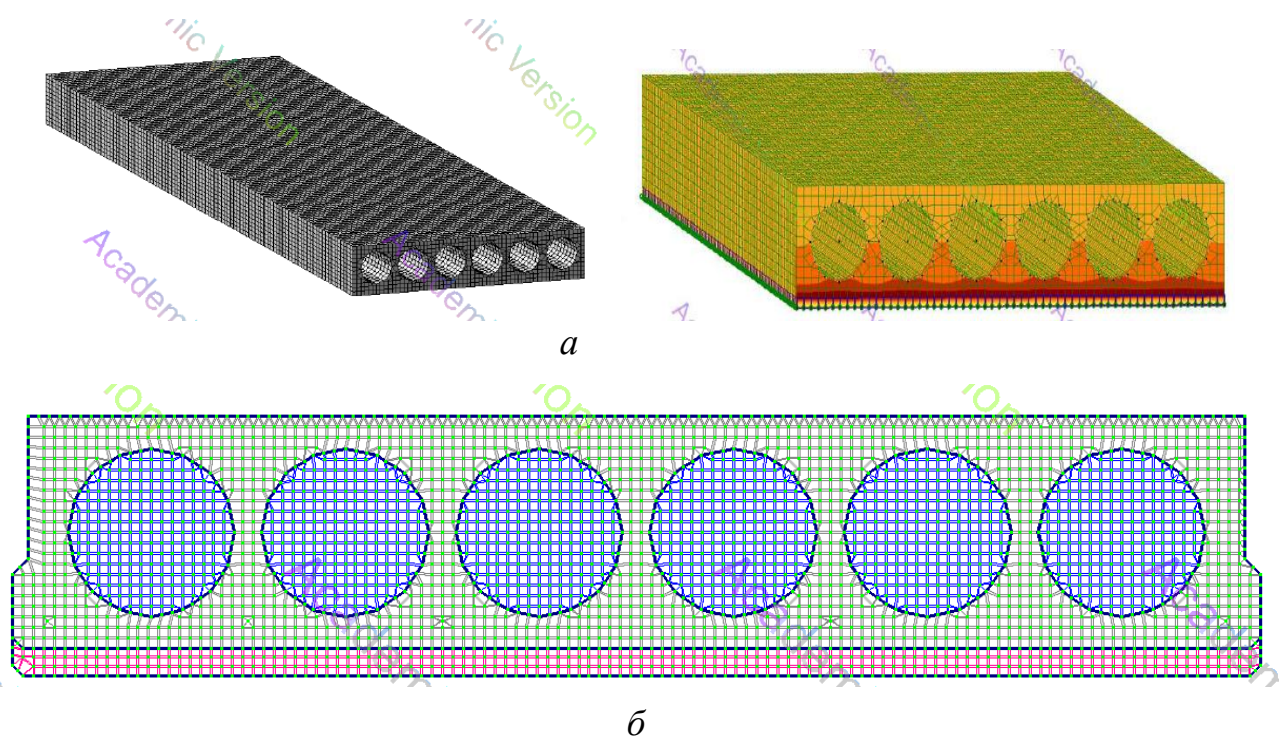


Рис. 16. Скінчено-елементна модель вогнезахисного багатопустотного залізобетонного перекриття в 3D (а) і 2D (б) постановці

Кількість вузлів скінчено-елементної моделі склала 3107, а кількість елементів – 3372. Крок розбиття перерізу склав $h = 0,01$ м, часовий крок $\Delta t = 60$ с.

В результаті чисельного моделювання розв'язанням прямих задач теплопровідності були отримані розподіли температур у вогнезахисному багатопустотному перекритті в будь-якій точці перерізу. На рис. 17 показано розподіл температури на 240 хвилині вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі.

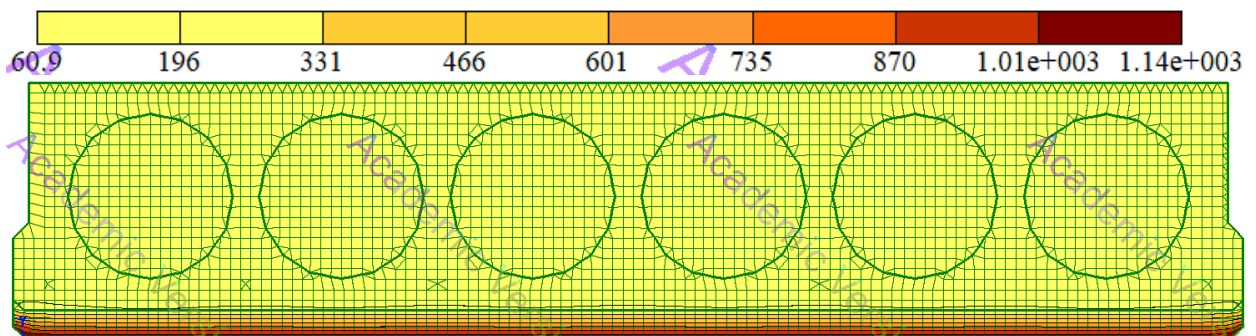


Рис. 17. Розподіл температур у фрагменті вогнезахисного залізобетонного перекриття на 240 хвилині випробування

Результати чисельного моделювання нестационарного прогрівання вогнезахисного залізобетонного перекриття в програмі «ЛІРА-САПР» порівняли з експериментальними випробуваннями у вогневій печі. Дані, представлені на рис. 17, а саме: температури з необігрівної поверхні вогнезахисного залізобетонного перекриття, співпадають з результатами експерименту. Це підтверджують дані, представлені на рис. 18, де показані температури з необігрівної поверхні вогнезахисного залізобетонного перекриття, отримані експериментально та в результаті чисельного моделювання.

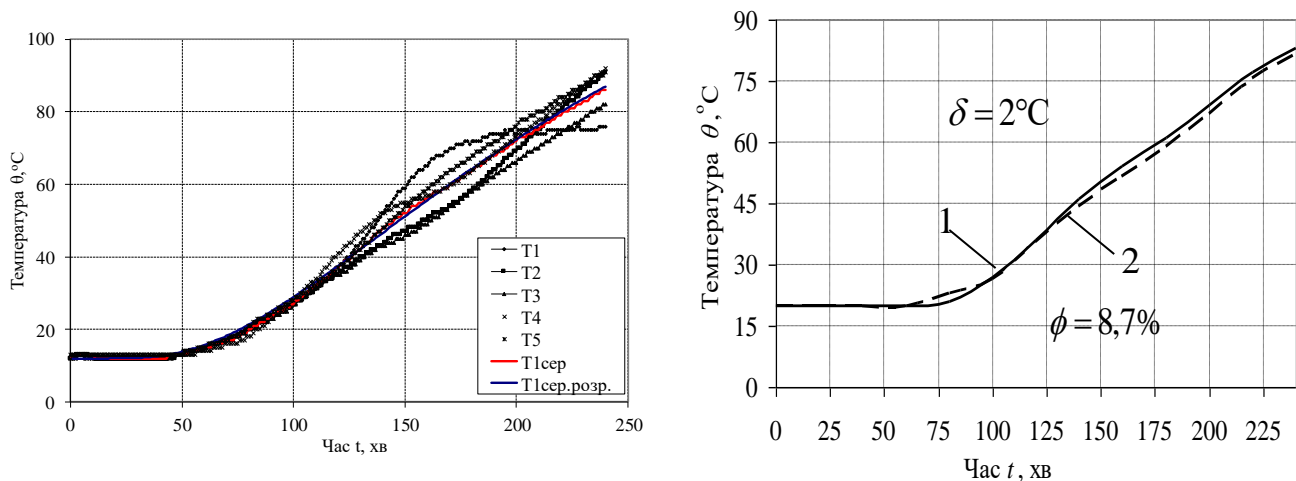


Рис. 18. Залежність температури від часу вогневого впливу з необігрівної поверхні перекриття зі штукатурним покриттям: 1 – експериментальна температура; 2 – розрахункова температура (ЛІРА-САПР)

Наступним етапом було моделювання напружено-деформованого стану вогнезахищеного залізобетонного перекриття. Для цього в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» була побудована модель (рис. 19) і прикладені навантаження $5,7 \text{ кН/м}^2$ та власна вага перекриття.

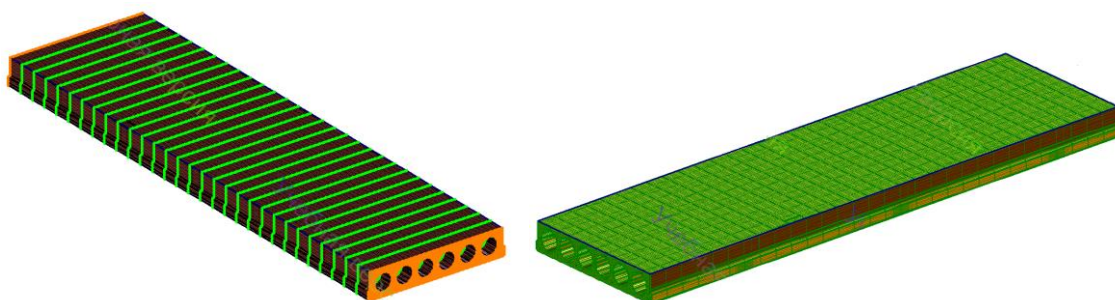


Рис. 19. Комп'ютерна модель напружено-деформованого стану вогнезахищеного залізобетонного перекриття

У програмному комплексі «ЛІРА-САПР» було виконано скінчено-елементний аналіз розглянутого вогнезахищеного залізобетонного перекриття. Розрахунок виконували із врахуванням фізичної нелінійності: експоненціальний та кусково-лінійний закони деформування, які враховують модуль пружності бетону, коефіцієнт лінійної температурної деформації бетону, граничну відносну деформацію бетону. Модель має 52206 вузлів та 48599 елементів. Крок розбиття по перерізу склав $h=0,01 \text{ м}$, часовий крок $\Delta t=60 \text{ с}$.

На рис. 20 зображено результати статичного розрахунку в програмному комплексі «ЛІРА-САПР». Як видно із рис. 20 прогин залізобетонного перекриття в середній частині плити був $39,8 \text{ мм}$, що задовільно корелює з експериментальними результатами (42 мм), а похибка не перевищує 5% .

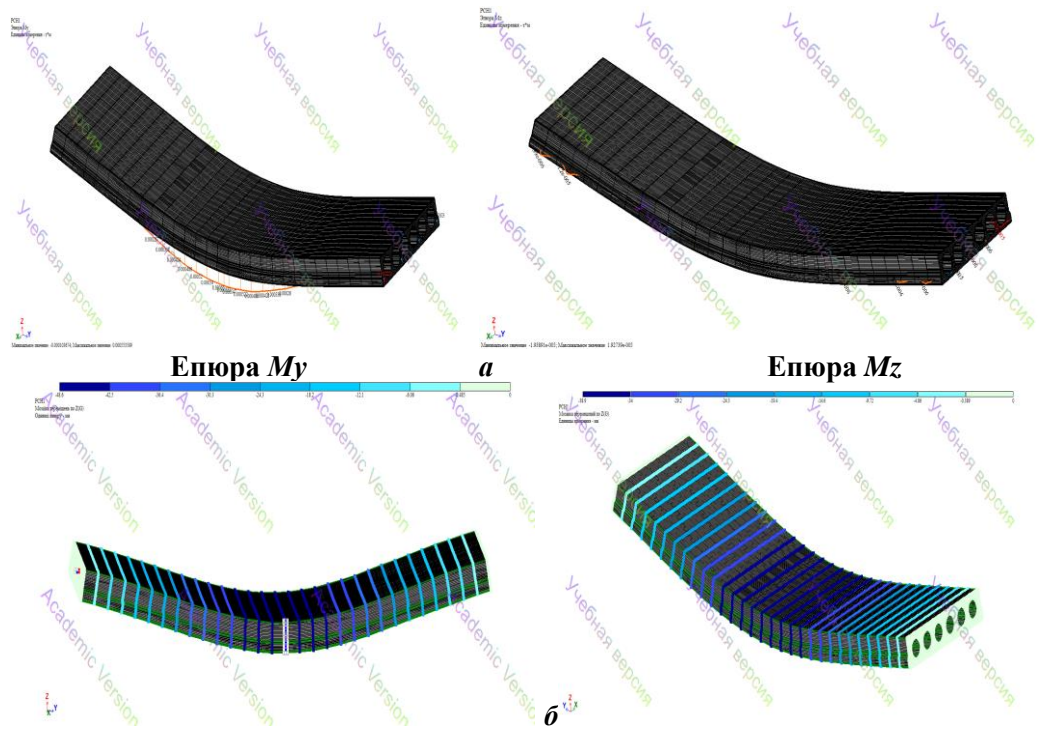


Рис. 20. Епюри моментів (а) та прогини (б) залізобетонної плити перекриття

Підтвердженням адекватності розробленої комп'ютерної моделі є дані рис. 21, на якому видно задовільну збіжність експериментальних та розрахункових значень прогину залізобетонного вогнезахищеного перекриття по середині прольоту за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі.

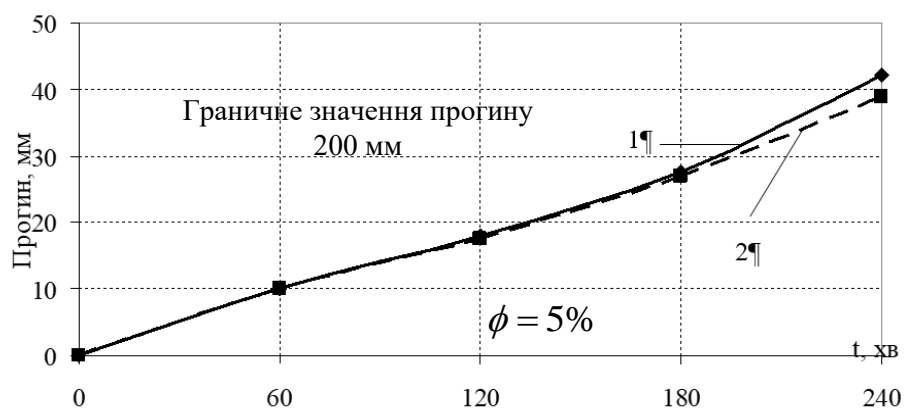


Рис. 21. Прогин залізобетонного вогнезахищеного перекриття по середині прольоту за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі: 1 – експеримент; 2 – розрахунок в програмному комплексі «ЛІРА-САПР»

Як зображено на рис. 21, найбільша область відхилення у значеннях прогину спостерігалася на 200 хвилині розрахунку, і становило близько 3 мм, що відповідає похибці 5 %. Це означає, що врахування всіх параметрів для побудови комп'ютерної моделі теплових процесів та напружено-деформованого стану в системі «залізобетонне перекриття – вогнезахисне покриття» відкриває можливість для оцінювання вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій з прикладенням навантаження в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму пожежі.

В результаті досліджень узагальнено можливості роботи комп'ютерної програми «ЛІРА-САПР» в області розрахунку та моделювання вогнестійкості

будівельних конструкцій, обґрунтована необхідність виконання досліджень за допомогою програми, обґрунтована можливість впровадження цієї програми при введенні будівель в експлуатацію, дослідження вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій експлуатованих будівель та споруд із вібронавантажених конструкцій.

Для перевірки ефективності розробленого методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій побудована модель вогнезахищеної залізобетонної колони в програмному комплексі «ЛІРА-САПР». Для цього були використані результати випробувань на вогнестійкість двох зразків-фрагментів залізобетонних колон квадратного перерізу, фактичним розміром 600×600 мм та висотою 2000 мм. Кожний зразок мав несучий каркас, що складався з 16-ти вертикальних несучих арматурних стрижнів Ø20 мм А400С. Бетон класу С25.

Алгоритм розроблення комп'ютерної моделі залізобетонної колони: система рівнянь, розв'язання яких дозволило отримати значення температури у кожному вузлі координатної сітки, що накладають на переріз. Координатну сітку накладали так, щоб її вузли були розташовані не тільки в товщині перерізу, але і по периметру, а також у центрі стрижнів для конструкцій з гнучкою арматурою, по довжині полиць і стінки в середині їхньої товщини для конструкцій з жорсткою арматурою. Для більш точних розрахунків розробниками програми крок сітки рекомендовано задавати в межах 0,01–0,03 м, але він обов'язково повинен бути більшим за максимальний діаметр робочої арматури. Під час моделювання нестационарного прогрівання залізобетонної колони в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» використана модель колони, яка обігривається з чотирьох сторін за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі. Теплофізичні і механічні характеристики залізобетону та сталі задані залежними від температури. Коефіцієнт теплопровідності та питома об'ємна теплоємність бетону колони були знайдені розв'язанням обернених задач теплопровідності за результатами випробувань на вогнестійкість.

В результаті чисельного моделювання були отримані розподіли температур у залізобетонній колоні в межах 30–120 хвилин вогневого впливу (рис. 22) за стандартним температурним режимом пожежі за умови обігрівання колони з чотирьох сторін.

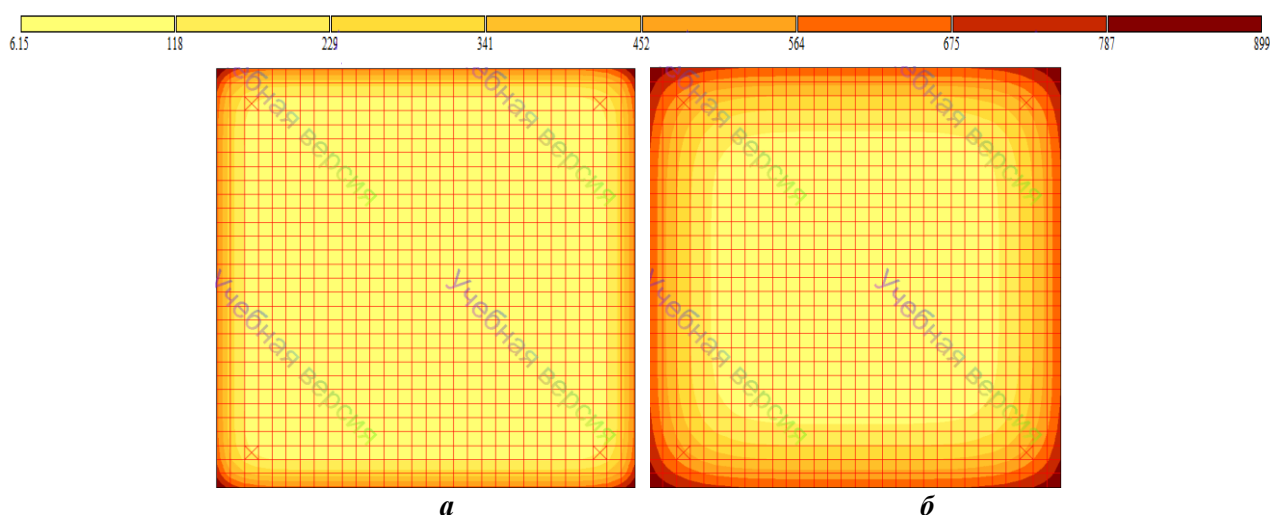


Рис. 22. Розподіл температур в залізобетонній колоні на 30 (а) та 120 (б) хвилинах

випробування

Використовуючи створену в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» модель (рис. 22) та теплофізичні характеристики досліджуваного пасивного вогнезахисного покриття для підвищення вогнестійкості залізобетонних конструкцій, було побудовано модель вогнезахисної залізобетонної колони (рис. 23).

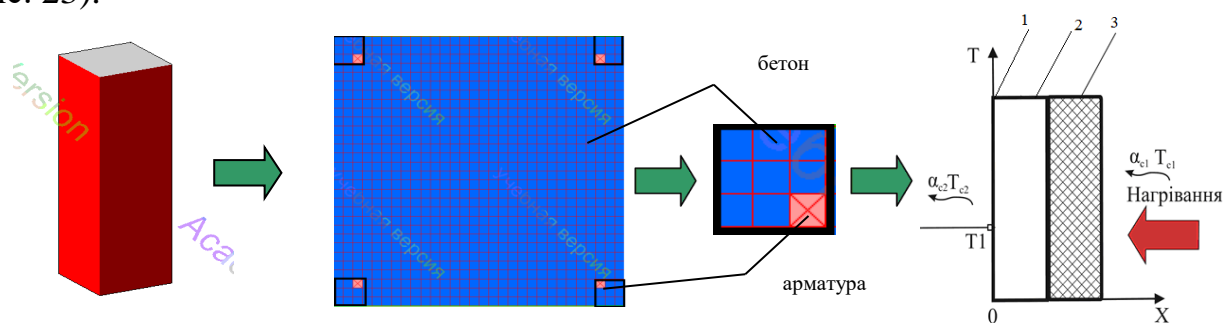


Рис. 23. Модель вогнезахисної залізобетонної колони: 1 – арматурний стержень; 2 – бетон; 3 – вогнезахисне покриття; T_1 – термопара, встановлена на арматурі

За допомогою розробленої моделі (рис. 23), використовуючи теплофізичні характеристики покриття, проведено моделювання вогнезахисту залізобетонної колони. В результаті проведених досліджень встановлено, що для підвищення межі вогнестійкості залізобетонної колони розмірами 600×600 мм до 180 хвилин необхідно запроєктувати вогнезахист у вигляді пасивного вогнезахисного покриття. Зокрема, товщина вогнезахисного покриття згідно з розрахунками, була 11 мм на основі розв'язання прямих задач теплопровідності у програмному комплексі FRIEND.

На рис. 24 представлені результати моделювання нестационарного прогрівання вогнезахисної залізобетонної колони на 120 хвилині випробування з товщиною вогнезахисного покриття 11 мм.

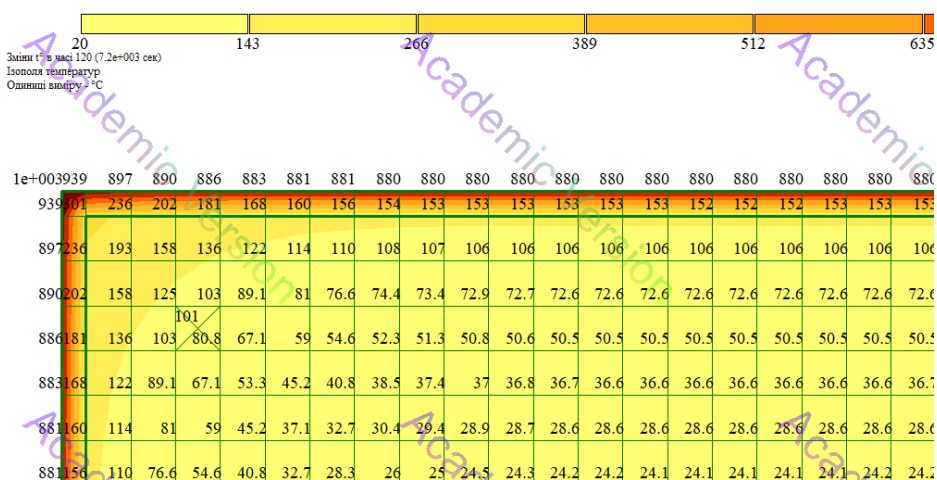


Рис. 24. Розподіл температур у вогнезахисній залізобетонній колоні на 120 хвилині випробування

Як видно із рис. 24, товщина пасивного вогнезахисного покриття 11 мм здатна знизити температуру прогрівання арматурних стержнів на 120 хвилині вогневого впливу в 4 рази. Ця обставина вказує на ефективність використання вогнезахисних залізобетонних конструкцій і дозволяє проектувати вогнезахист залізобетонних колон залежно від забезпечення нормованих значень меж

вогнестійкості конструкцій.

У п'ятому розділі «Впровадження розробленого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій» розроблено математичну модель будівлі, що дозволяє оцінити рівень пожежної безпеки об'єкта в частині забезпечення вогнестійкості та прийняти ефективні рішення щодо підвищення вогнестійкості конструкцій з використанням вогнезахисних покриттів з обґрунтованими параметрами та умовами експлуатації. Для цього були використані результати розрахунків теплового та напружено-деформованого станів вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій на прикладі будівлі із вогнезахисних конструкцій. Для цього було обрано 3-ох поверховий паркінг, що є монолітно-каркасною будівлею, виконаною із монолітного залізобетону (рис. 25).

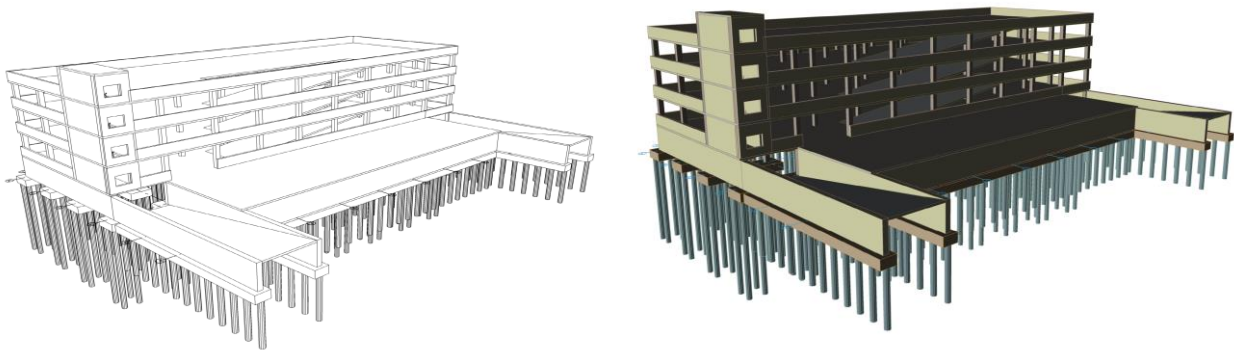


Рис. 25. Загальний вигляд трьохповерхового паркінгу, побудованого в програмному комплексі «ЛІРА-САПР»

На рис. 25 показано створену в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» скінчено-елементну модель трьохповерхового 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 $0,36 \text{ т/м}^2$.

На рис. 26 показано створену в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» скінчено-елементну модель трьохповерхового паркінгу, задані навантаження на конструкції паркінгу.

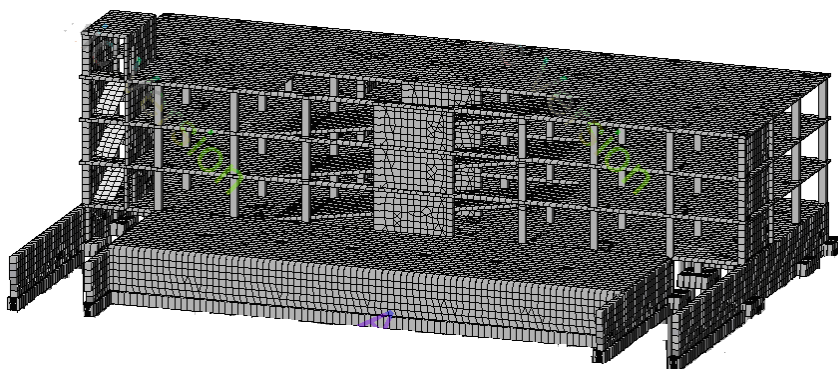


Рис. 26. Скінчено-елементна 3D модель трьохповерхового паркінгу

Було змодельовано варіанти пожеж для дослідження вогнестійкості (стійкості) будівлі залежно від місця виникнення та пожежного навантаження на

вогнезахищені залізобетонні конструкції будівлі паркінгу (рис. 27).

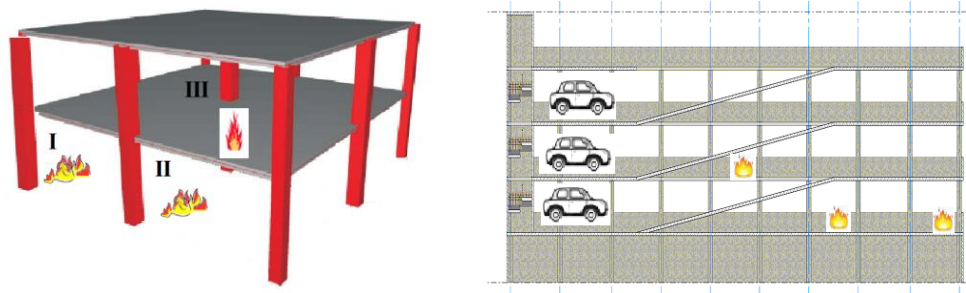


Рис. 27. Варіанти розрахункових сценаріїв виникнення пожежі в паркінгу: I – біля лівої колони; II – біля крайньої центральної колони; III – біля центральної колони в центрі паркінгу

В результаті чисельного моделювання було встановлено місце виникнення пожежі, наслідки 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 (рис. 28).

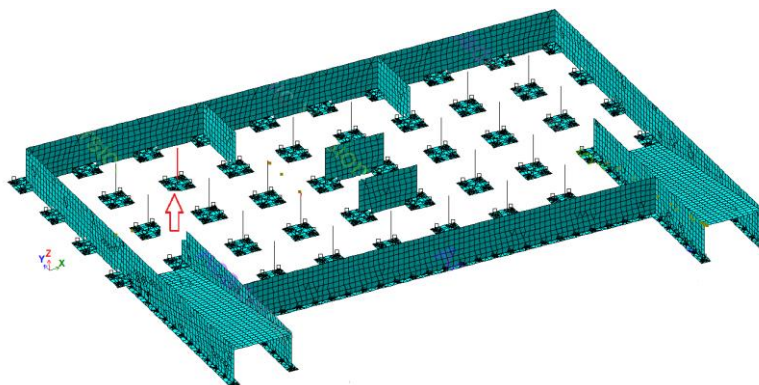


Рис. 28. Місце виникнення пожежі, наслідки від якої призведуть до найбільших значень зусиль та навантажень в конструкціях

Для розрахунків нерівномірних розподілів температури в поперечному перерізі вогнезахищеної залізобетонної колони застосовували математичну модель нестационарної теплопровідності, математичний апарат якої використано в програмі «ЛІРА-САПР». Модель являє собою диференційне рівняння теплопровідності, яка враховує радіаційно-конвективний теплообмін від газового середовища до обігрівних поверхонь колони (обігріваних з 4-ох сторін) (граничні умови III-го роду) та теплообмін теплопровідністю в колоні. Для розв'язання рівняння теплопровідності використовували метод скінчених елементів, реалізований в програмі «ЛІРА-САПР».

В програмі «ЛІРА-САПР» реалізовані підходи, засновані на тому, що якщо необхідно підвищити межу вогнестійкості залізобетонної колони до нормованих значень, то це досягається проєктуванням додаткової арматури. У випадку, якщо необхідно підвищити межу вогнестійкості колони з 150 до 180 хвилин, площу армування збільшують в 10 разів. Так, для забезпечення межі вогнестійкості 150 хв залізобетонної колони квадратного перерізу розмірами $0,5 \times 0,5 \times 3$ м

максимальна площа армування складає $5,55 \text{ см}^2$. Для забезпечення межі вогнестійкості 180 хв така сама колона потребує збільшення максимальної площі армування до $58,7 \text{ см}^2$. Такі підходи можливо використовувати під час проектування будівель та споруд, проте взагалі не прийнятні при експлуатації вже побудованих будівель, та коли необхідно підвищити межі вогнестійкості залізобетонних конструкцій до нормованих значень.

Для деталізації результатів розрахунку була виділена частина конструктивної будівлі паркінгу (рис. 29), на якій більш детально показано вплив навантажень від власної ваги конструкцій, постійних та тимчасових навантажень.

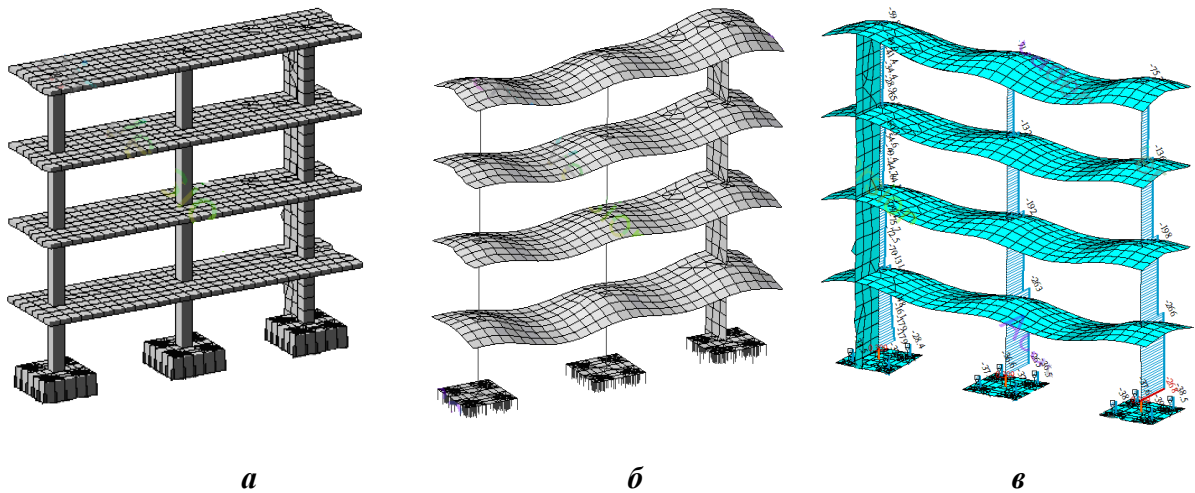


Рис. 29. Частина схеми будівлі паркінгу (а), деформативна схема (б) та епюра зусиль в колонах (в)

На рис. 30 зображено результати розрахунків межі вогнестійкості будівельних конструкцій будівлі паркінгу та мозаїку переміщень по вісі Z(G) (рис. 31).

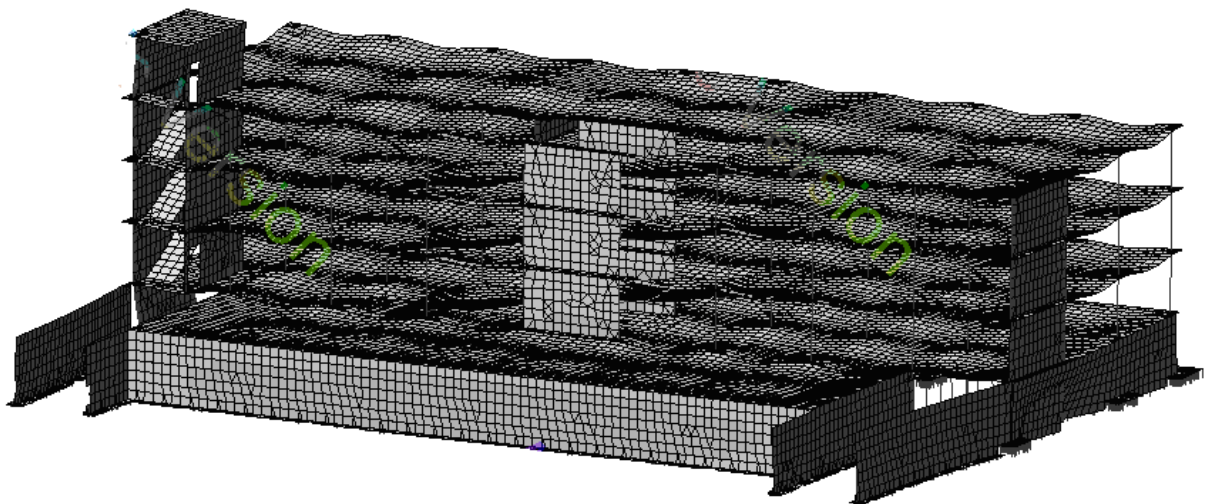


Рис. 30. Результати розрахунку межі вогнестійкості конструкцій за розрахунковим сценарієм виникнення пожежі в паркінгу (I)

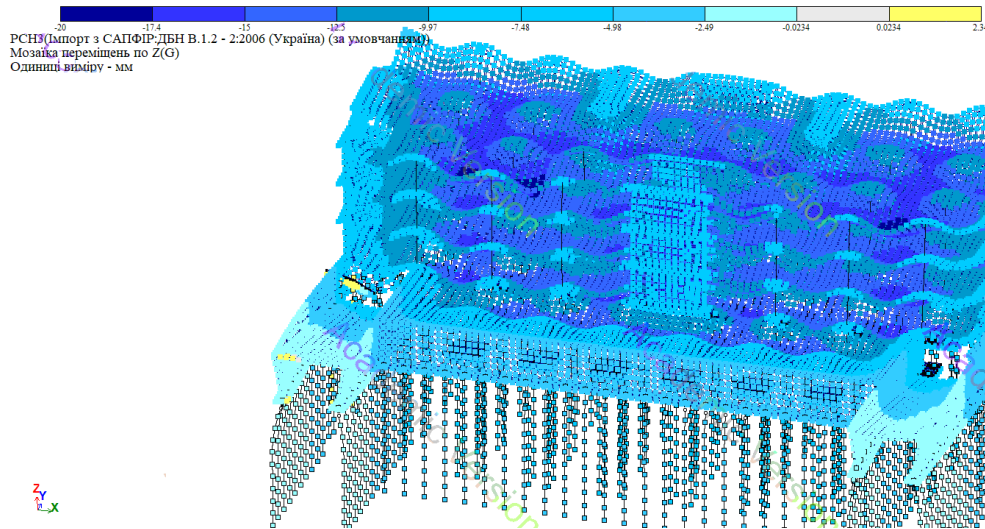


Рис. 31. Мозаїка переміщень по Z(G)

Таким чином, побудовані комп'ютерні моделі теплового та напружено-деформованого стану будівлі із вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій (на прикладі трьохповерхового паркінгу для автомобілів), які дозволяють враховувати теплофізичні характеристики вогнезахисних покриттів, теплофізичні та механічні властивості матеріалів, з яких складається конструкція, нелінійні закони деформування матеріалів моделі, механічні властивості матеріалів за умов високотемпературних та силових впливів. В результаті виконаних 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 варіанта у разі прогнозування втрати вогнестійкості і, як наслідок, втрати несучої здатності будівельних конструкцій і будівлі в цілому, так і у разі застосування заходів із забезпечення вогнестійкості вогнезахисних будівельних конструкцій.

У шостому розділі «Економічна ефективність застосування розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій» визначено економічну ефективність застосування методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. Показано, що витрати у разі використання розрахунково-експериментального методу під час оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій (на прикладі паркінгу для автомобілів) у 6 разів менші, ніж витрати під час оцінювання експериментальним методом. Проведено техніко-економічне обґрунтування застосування вогнезахисних залізобетонних конструкцій з науково обґрунтованими товщинами вогнезахисних покриттів. Встановлено, що у разі використання такого протипожежного заходу, втрати від пожежі в паркінгу для автомобілів можливо зменшити у 15 разів. Проведені розрахунки економічного ефекту від впровадження розробленого методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних конструкцій на прикладі паркінгу для автомобілів. Встановлено, що витрати від використання підходу щодо підвищення вогнестійкості залізобетонних колон шляхом застосування вогнезахисних покриттів в 5 разів менші від витрат у разі використання додаткового армування для підвищення межі вогнестійкості залізобетонної колони з 150 до 180 хвилин (економія 21 %).

ВИСНОВКИ

За результатами виконання дисертаційної роботи вирішено **актуальну проблему** у сфері пожежної безпеки, що полягає у недосконалому методі оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій, шляхом розробки і реалізації розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій з обґрунтованими параметрами та умовами експлуатації вогнезахисних покриттів. В результаті дисертаційного дослідження отримані наступні наукові та практичні результати:

1. Проаналізовані сучасні методи та підходи щодо забезпечення та оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій. Виявлено шляхи підвищення рівня пожежної безпеки об'єктів під час проектування, будівництва та експлуатації будівель та споруд. Встановлено, що будівлі та споруди мають недостатню стійкість у разі високотемпературного, силового та кліматичного впливів внаслідок неврахування найбільш значущих чинників впливу вогнезахисних властивостей покриттів у системі «будівельна конструкція – вогнезахисне покриття». Обґрунтована необхідність розвитку наукових основ оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій для забезпечення безпечної експлуатації будівель та споруд. За результатами аналізу сформульовано ідею, яка полягає у створенні передумов зниження впливу небезпечних чинників пожежі, таких як обвалення будівель та споруд, внаслідок втрати вогнестійкості будівельних конструкцій шляхом застосування під час проектування, будівництва та експлуатації вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій з обґрунтованими параметрами та умовами експлуатації вогнезахисних покриттів.

2. Визначено особливості впливу найбільш значущих параметрів у системі «залізобетонна конструкція – вогнезахисне покриття» на вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій, які впливають на тепловий та напружено-деформований стан зазначених конструкцій. До таких параметрів віднесено товщину вогнезахисного покриття, коефіцієнт теплопровідності, питому об'ємну теплоємність вогнезахисного покриття та матеріал конструкції, механічні характеристики будівельної конструкції, режими пожежі, умови випробувань. Встановлено, що вказані параметри є базовими для подальших розрахунків, які потрібно забезпечувати та/або враховувати під час процесу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних будівельних конструкцій.

Розроблено математичну модель для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій, яка дозволяє враховувати теплофізичні характеристики залізобетонних конструкцій та вогнезахисних покриттів, особливості режимів пожежі, механічні властивості матеріалів за високих температур, нелінійні закони деформування матеріалів конструкції, кліматичні фактори.

Встановлено, що зі збільшенням відносної вологості понад 90 %, утриманням температури навколишнього середовища на рівні менше 30 °C та концентрації у повітрі твердих домішок понад 70 мкг/м³, коефіцієнт теплообміну досягає раціональних значень в межах 70–77 Вт/(м²·°C) та вище. Зменшення концентрації твердих домішок до рівня 50 мкг/м³ спричиняє зменшення коефіцієнта теплообміну до 45 Вт/(м²·°C), а з одночасним зменшенням

температури навколишнього середовища до 10 °C коефіцієнт теплообміну починає підвищуватися до 65 Вт/(м²·°C).

3. Розроблено розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій, який відрізняється від наявних ідентифікацією теплофізичних характеристик моделі на основі розв'язання обернених задач теплопровідності за даними випробувань на вогнестійкість, визначенням мінімальної товщини вогнезахисного покриття за результатами випробувань на вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій за різних умов випробувань та значеннях чинників впливу. Встановлено, що різниця між значеннями мінімально необхідної товщини вогнезахисного покриття для стандартного температурного режиму та температурного режиму вуглеводневої пожежі становить близько 12 %, а різниця між значеннями необхідної товщини вогнезахисного покриття для стандартного температурного режиму та температурного режиму тунельної пожежі за стандартами Нідерландів (RWS) – 29 %. Експериментально виявлено вплив кліматичних факторів на вогнестійкість вогнезахисних будівельних конструкцій. Встановлено, що внаслідок еквівалентного трирічного впливу кліматичних факторів (за методикою пришвидшеного старіння) характерних для приміщення, що не опалюється, значення теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття не відрізняються від початкового значення.

4. Переверіено достовірність розроблених математичної моделі та розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. Показано, що випадкові похибки у 10 % у разі вимірювання температур з необігрівної поверхні вогнезахисного перекриття суттєво впливають на точність визначення теплофізичних характеристик покриття (максимальна похибка до 30 %). Встановлено, що найбільший вплив на точність оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій мають коефіцієнт теплопровідності вогнезахисного покриття (50 %), питома об'ємна теплоємність бетону (25 %), коефіцієнт тепловіддачі між необігрівною поверхнею конструкції та навколишнім середовищем (15 %).

5. Розроблено методологічну базу для оцінювання та прогнозування вогнестійкості будівель із вогнезахисних будівельних конструкцій шляхом побудови моделей теплового та напружено-деформованого стану будівлі, що відрізняються від тих, що існують, врахуванням наявності та властивостей вогнезахисних покриттів, високотемпературних, силових та кліматичних впливів, сумісної роботи будівельних конструкцій всієї будівлі. Розроблено структурно-логічну схему забезпечення вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій на основі запропонованих математичної моделі та розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій.

На основі методологічної бази розроблено математичну модель будівлі для розрахунково-експериментального оцінювання вогнестійкості, що дозволяє проводити моделювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій, конструктивної системи чи її частини та оцінювати рівень пожежної безпеки об'єкта в частині забезпечення вогнестійкості, та приймати ефективні рішення щодо підвищення вогнестійкості залізобетонних

конструкцій. Встановлено, що результати чисельного моделювання за допомогою розроблених комп'ютерних моделей є адекватними щодо оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій, оскільки середньоквадратичне відхилення розрахункових температур від експериментальних результатів не перевищує похибку в 9 %.

б. Розроблені рекомендації з впровадження запропонованого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій в практику проектування вогнезахисних будівельних конструкцій будівель та споруд, які реалізовані під час розроблення нормативних документів та в освітньому процесі.

Розрахований економічний ефект від впровадження розробленого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій порівняно з існуючими методами. Ефект полягає в тому, що витрати у разі використання розробленого методу під час оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій (на прикладі паркінгу для автомобілів) у 6 разів менші, ніж витрати під час оцінювання експериментальним методом. Загальна сума економічного ефекту, яку можна досягти у випадку використання розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій, складає близько 6,8 млн. грн. Виконане техніко-економічне обґрунтування застосування вогнезахисних залізобетонних конструкцій з обґрунтованими товщинами вогнезахисних покриттів, внаслідок якого встановлено, що у разі використання такого протипожежного заходу, втрати від пожежі в паркінгу для автомобілів можливо зменшити у 15 разів.

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Монографії:

1. 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>. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Статті у періодичних виданнях України, включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України:

2. 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. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266219> (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).

3. Kovalov A., Otrosh Y, Vedula S., Danilin O., Kovalevska T. (2019). Parameters of fire-retardant coatings of steel constructions under the influence of climatic factors. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, (3), 46–53. DOI: 10.29202/nvngu/2019-3/9. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Статті у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз:

4. Нуянзін В.М., Ковальов А.І. Обґрунтування методики дослідження впливу кліматичних чинників на вогнестійкість залізобетонної колони. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Кременчук: КрНУ. 2014. Випуск 6(89). частина 1. С.153–157. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

5. Ковальов А.І., Нуянзін В.М., Ведула С.А. Експериментальні дослідження впливу кліматичних факторів на вогнезахисну здатність покриттів для сталевих конструкцій. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Кременчук: КрНУ. 2016. Випуск 5 (100). С.70–75. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

6. Ковальов А.І. Вплив випадкових помилок у вимірюванні температур на похибку визначення теплофізичних характеристик покриттів залізобетонних перекриттів. Проблеми пожежної безпеки. Х.: НУГЗУ. 2017. Вып. 41. С. 87–91. (Видання включено до міжнародних наукометричних баз Ulrich's Periodicals Directory, Academic Research Index – ResearchBib, Google Scholar).

7. Ковальов А.І., Зобенко Н.В., Отрош Ю.А., Хмиров І.М., Данілін О.М. Точність визначення параметрів покриттів сталевих конструкцій при вуглеводневому режимі пожежі. Проблеми пожежної безпеки. Х.: НУГЗУ. 2018. Вып. 43. С.73–79. (Видання включено до міжнародних наукометричних баз Ulrich's Periodicals Directory, Academic Research Index – ResearchBib, Google Scholar).

8. Ковальов А.І., Отрош Ю.А., Данілін О.М., Алексєєва О.С., Хмиров І.М. Методика оцінки вогнезахисної здатності покриттів сталевих конструкцій після впливу кліматичних факторів. Проблеми пожежної безпеки. Х.: НУГЗУ. 2018. Вып. 44. С. 49–56. (Видання включено до міжнародних наукометричних баз Ulrich's Periodicals Directory, Academic Research Index – ResearchBib, Google Scholar).

9. Ковальов А.І., Отрош Ю.А., Данілін О.М. Експериментальні дослідження вогнестійкості залізобетонних перекриттів з системою вогнезахисту. Проблеми пожежної безпеки. Х.: НУГЗУ. 2019. Вып. 45. С. 73–78. (Видання включено до міжнародних наукометричних баз Ulrich's Periodicals Directory, Academic Research Index – ResearchBib, Google Scholar).

10. Ковальов А.І., Отрош Ю.А., Томенко В.І. Моделювання теплового стану сталевих конструкцій за температурного режиму вуглеводневої пожежі. Проблеми надзвичайних ситуацій. Х.: НУЦЗУ. 2020. № 31. С.187–197. (Видання включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Research Bib, OpenAIRE, ZENODO, Google Scholar).

11. Ковальов А.І., Отрош Ю.А., Томенко В.І., Данілін О.М., Безугла Ю.С., Карпець К.М. Оцінювання вогнезахисної здатності реактивних покриттів сталевих конструкцій. Проблеми надзвичайних ситуацій. Х.: НУЦЗУ. 2020. № 2 (32). С. 44–55. (Видання включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Research Bib, OpenAIRE, ZENODO, Google Scholar).

12. Ковальов А.І., Отрош Ю.А., Коссе А.Г., Черненко О.М. Залежність точності визначення теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів від

параметрів моделі. Проблемы пожарной безопасности. Х.: НУЦЗУ. 2020. № 48. С.63–70. (Видання включено до міжнародних наукометричних баз Ulrich's Periodicals Directory, Academic Research Index – ResearchBib, Google Scholar).

13. Ковальов А.І., Отрош Ю.А., Томенко В.І., Пирогов О.В., Морковська Н.Г. Розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій. Проблеми надзвичайних ситуацій. Х.: НУЦЗУ. 2021. № 34. С.77–93. (Видання включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Research Bib, OpenAIRE, ZENODO, Google Scholar).

14. A. Kovalov, Y. Otrosh, V. Tomenko, V. Slovinsky. Evaluation of fire resistance of fire protected steel structures by calculation and experimental method. Mechanics and mathematical methods. Одеса: ОДАБА. 2021. Том 3. Випуск 2. С. 29–39. (Видання включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Google Scholar).

15. Ковальов А.І., Отрош Ю.А., Томенко В.І., Кондратьєв А.В. Оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій. Вісті Донецького гірничого інституту. Донецьк: ДВНЗ «ДНТУ». 2021. № 2. С. 149–158. (Видання включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Research Bib, Citefactor, International Society for Research Activity (ISRA) Journal Impact Factor (JIF), International Accreditation and Research Council (IARC), Root Society for Indexing and Impact Factor Service (Rootindexing), General Impact Factor (GIF)).

16. Ковальов А.І., Отрош Ю.А., Томенко В.І., Васильєв О.Б. Оцінювання вогнезахисної здатності новостворених вогнезахисних покриттів сталевих конструкцій. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Одеса: ОДАБА. 2021. № 85. С. 79–88 (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

17. Kovalov A., Poklonskyi V., Otrosh Y., Tomenko V., Yurchenko S. Calculation of fire resistance of fire protected reinforced concrete structures. Проблеми надзвичайних ситуацій. Х.: НУЦЗУ. 2022. № 1 (35) С. 17–30. (Видання включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Research Bib, OpenAIRE, ZENODO, Google Scholar).

18. Отрош Ю.А., Ковальов А.І., Пурденко Р.Р., Рашкевич Н.В., Майборода Р.І. Дослідження вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій для підвищення рівня пожежної безпеки. Проблеми надзвичайних ситуацій. Х.: НУЦЗУ. 2022. № 2(36). С.102–122. (Видання включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Research Bib, OpenAIRE, ZENODO, Google Scholar).

19. Ковальов А.І., Пурденко Р.Р., Отрош Ю.А., Томенко В.І., Качкар Є.В., Майборода Р.І. Оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих балок. Вісті Донецького гірничого інституту. Донецьк: ДВНЗ «ДНТУ». 2022. № 2 (51). С.43–53. (Видання включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Research Bib, Citefactor, International Society for Research Activity (ISRA) Journal Impact Factor (JIF), International Accreditation and Research Council (IARC), Root Society for Indexing and Impact Factor Service (Rootindexing), General Impact Factor (GIF)).

20. Ковальов А.І., Пурденко Р.Р., Отрош Ю.А., Томенко В.І., Рашкевич Н.В., Юрченко С.П. Моделювання нестационарного прогріву вогнезахисних

залізобетонних колон. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. Київ: ІДУтаНДЦЗ. 2022. № 2(14). С.89–100. (Видання включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Google Scholar).

21. Ковальов А.І., Отрош Ю.А., Пурденко Р.Р., Томенко В.І. Дослідження вогнестійкості захищених реактивними вогнезахисними речовинами сталевих будівельних конструкцій. Пожежна безпека. Львів: ЛДУБЖД. 2022. № 41. С.57–66. (Видання включено до міжнародних наукометричних баз Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar).

22 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. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

Статті у наукових фахових виданнях України:

23. Ковалев А.И., Круковский П.Г., Абрамов А.А. Анализ влияния ошибок измерения температур на погрешность определения теплофизических и огнезащитных характеристик покрытий железобетонных перекрытий. Пожежна безпека: теорія і практика. 2012. № 10. С. 66–72.

24. Ковалев А.И., Круковский П.Г., Качкар Е.В. Определение характеристик вспучивающегося огнезащитного покрытия «Феникс СТВ» по данным испытаний на огнестойкость монолитного перекрытия // Пожежна безпека: теорія і практика. 2012. № 11. С. 43–51.

25. Ковалев А.И. Влияние погрешностей в измерении температур на точность определения теплофизических характеристик покрытий монолитных железобетонных перекрытий. Пожежна безпека: теорія і практика. 2012. № 12. С. 41–45.

26. Ковалев А.И., Круковский П.Г., Черненко К.А., Метель М.А., Абрамов А.А. Моделирование теплового состояния и огнестойкости многопустотного железобетонного перекрытия. Пожежна безпека: збірник наукових праць. 2012. № 21. С. 85–94.

27. Ковалев А.И. Определение характеристики огнезащитной способности покрытий железобетонных перекрытий для различных температурных режимов пожара. Пожежна безпека: теорія і практика. 2013. № 13. С. 4–9.

28. Ковалев А.И. Влияние параметров модели на точность определения теплофизических характеристик огнезащитного покрытия. Пожежна безпека: теорія і практика. 2013. № 14. С. 64–68.

29. Ковальов А.І., Качкар Є.В., Зобенко Н.В., Тищенко О.М. Особливості застосування покриттів металевих конструкцій при різних температурних режимах пожежі. Пожежна безпека: теорія і практика. 2014. № 16. С. 135–139.

30. Ковальов А.І., Качкар Є.В., Зобенко Н.В., Долішній Ю.В. Експериментальне дослідження вогнезахисної здатності покриття «Amotherm Steel Wb» при температурному режимові вуглеводневої пожежі. Пожежна безпека: теорія і практика. 2014. № 17. С. 53–60.

31. Ковальов А.І., Зобенко Н.В. Методика попередньої оцінки вогнезахисної здатності покриттів для сталевих конструкцій в умовах температурного режиму

вуглеводневої пожежі. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2016. № 1. С. 59–65.

32. Ковальов А.І. Обґрунтування параметрів вогнезахисного штукатурного покриття для захисту залізобетонних перекриттів. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2017. № 3. С. 20–27.

33. Ковальов А.І. Дослідження точності визначення параметрів покриттів для вогнезахисту сталевих конструкцій. Промислове будівництво та інженерні споруди. 2017. № 4. С. 11–15.

34. Ковальов А.І., Ведула С.А., Грушовінчук О.В. Особливості та проблеми визначення прогнозованого строку придатності вогнезахисних покриттів сталевих конструкцій. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2017. Вип. 34. С. 232–238.

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав з напрямку, з якого підготовлено дисертацію:

35. Ковалев А.И., Дашковский В.Ю. Исследование огнезащитной способности покрытия «Amotherm Steel Wb» для защиты металлических конструкций расчетно-экспериментальным методом. Ежеквартальный журнал СНООР «Безопасность и Пожарная Техника». ВіТР. Volume 35. Issue 3. 2014. P. 107–113. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

36. Ковалев А.И., Зобенко Н.В. Исследование точности определения параметров огнезащитных покрытий металлических конструкций. Ежеквартальный журнал СНООР «Безопасность и Пожарная Техника». ВіТР. Volume 43. Issue 3. 2016. P. 45–50. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

Статті у закордонних виданнях, проіндексованих у базі даних Scopus, з напрямку, з якого підготовлено дисертацію:

37. 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. 60. 00003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000003>. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).

38. Vasilchenko A., Otrosh Y., Adamenko N., Doronin E., Kovalov A. Feature of fire resistance calculation of steel structures with intumescent coating. MATEC Web of Conferences. 2018. 230. 02036. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201823002036>. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).

39. Kovalov A., Konoval V., Khmyrova A., Dudko K. Parameters for simulation of the thermal state and fire-resistant quality of hollow-core floors used in the mining industry. E3S Web of Conferences. 2019. 123. 01022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301022>. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).

40. Kovalov A., Otrosh Y., Kovalevska T., Safronov S. Methodology for assessment of the fire-resistant quality of reinforced-concrete floors protected by fire-retardant coatings. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. 708. 012058. doi:10.1088/1757-899X/708/1/012058. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).

41. Kovalov A., Otrosh Y., Semkiv O., Konoval V., Chernenko O. Influence of the fire temperature regime on the fire-retardant ability of reinforced-concrete floors coating. Trans Tech Publications Ltd. In Materials Science Forum. 2020. Volume 1006. P. 87–92. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).

42. Kovalov, A., Otrosh, Y., Chernenko, O., Zhuravskij, M., & Anszczak, M. Modeling of non-stationary heating of steel plates with fire-protective coatings in ansys under the conditions of hydrocarbon fire temperature mode. Trans Tech Publications Ltd. In Materials Science Forum. 2021. Volume 1038. P. 514–523. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).

43. Kovalov A., Otrosh Y., Poklonskyi V., Semkiv O. & Tomenko M. Research of fire resistance of fire protected reinforced concrete structures. Trans Tech Publications Ltd. In Materials Science Forum. 2022. Volume 1066. P. 224–232. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Відомості про апробацію результатів дисертації:

44. Ковальов А.І., Качкар Є.В., Зобенко Н.В., Парахоненко С.Г. Особливості та проблеми визначення вогнезахисної здатності покриттів металевих конструкцій при температурному режимі вуглеводневої пожежі // Надзвичайні ситуації: безпека та захист: матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції, 9-10 жовтня 2014 року, Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2014. С. 127–129. (Форма участі – очна).

45. Ковальов А.І., Федоренко М.П., Зобенко Н.В., Січко М.П. Визначення характеристики вогнезахисної здатності покриттів металевих конструкцій при різних температурних режимах пожежі // Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції, 12-13 грудня 2014 року, Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2014. С. 239–240. (Форма участі – заочна).

46. Ковальов А.І., Зобенко Н.В. Забезпечення вогнестійкості металевих конструкцій в умовах впливу підвищених температур пожежі // Матеріали 17-ї Всеукраїнської наук.-практ. конф. рятувальників, 22–23 вересня 2015 року, К.: ІДУЦЗ, 2015. С. 188–189. (Форма участі – заочна).

47. Ковальов А.І., Зобенко Н.В., Mr. Emilio Montefiori. Випробування сталевих пластин з вогнезахистом при температурному режимові вуглеводневої пожежі // Надзвичайні ситуації: безпека та захист: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю, 9–10 жовтня 2015 року, Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2015. С. 70–71. (Форма участі – заочна).

48. Ковальов А.І., Степанюк О.В., Азза В.І., Марченко М.В., Зобенко Н.В. Вплив температурних режимів пожежі на значення межі вогнестійкості металевих конструкцій // Прикладні аспекти техногенно-екологічної безпеки: збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції, 4 грудня 2015 року, Харків: НУЦЗ України, 2015. С. 49–50.

49. Ковальов А.І., Зобенко Н.В., Ведула С.А. Визначення характеристики вогнезахисної здатності покриттів металевих конструкцій при їх випробуванні в умовах температурного режиму вуглеводневої пожежі // Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації: Матеріали міжнародної науково-практичної

конференції, 20–21 жовтня 2016 року, Львів: ЛДУБЖД, 2016. С. 174. (Форма участі – заочна).

50. Нуянзін В.М., Ковальов А.І., Ведула С.А., Нестеренко А.А., Жаврук П.С. Дослідження впливу кліматичних факторів на властивості вогнезахисних покриттів для сталевих конструкцій // Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції, 21–22 жовтня 2016 року, Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2016. С. 13–15. (Форма участі – заочна).

51. Ковальов А.І., Зобенко Н.В., Ведула С.А. Точність визначення теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів сталевих конструкцій // Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції, 18–19 травня 2017 року, Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2017. С. 196. (Форма участі – заочна).

52. Ковалев А.И., Зобенко Н.В., Олийнык И.Я. Определение характеристики огнезащитной способности покрытий металлических конструкций при их испытаниях в условиях температурного режима углеводородного пожара // XVIII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering, production engineering and physics», 2017, Czestochowa: Czestochowa university of technology, 2017. P. 427–430. (Форма участі – заочна).

53. Ковальов А.І., Ведула С.А., Отрош Ю.А. Вогнезахист сталевих конструкцій після впливу на них кліматичних факторів // Актуальні проблеми інженерної механіки: Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції, 22–25 травня 2018 року, Одеса: ОДАБА, 2018. С.45–46. (Форма участі – заочна).

54. Ковальов А.І., Отрош Ю.А., Король О.В. Методика оцінювання вогнезахисної здатності покриттів сталевих конструкцій // Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті: матеріали 8-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 20-22 листопада 2019 року, Харків: УДУЗТ, 2019. С. 76–77. (Форма участі – заочна).

55. Ковальов А.І., Гаркавий С.Ф., Морозова Д.М., Оллапалло Томас. Дослідження вогнезахисної здатності покриттів сталевих конструкцій // Проблеми надзвичайних ситуацій: матеріали міжнародної науково-практичної конференції, 20 травня 2020 року, Харків: НУЦЗУ, 2020. С. 71–72. (Форма участі – заочна).

56. Ковальов А.І., Отрош Ю.А., Качан Н.В., Качкар Є.В., Гаркавий С.Ф. Розробка моделі нестационарного прогріву системи «сталева пластина–вогнезахисне покриття» // Проблеми надзвичайних ситуацій: матеріали міжнародної науково-практичної конференції, 20 травня 2021 року, Харків: НУЦЗУ, 2021. С. 45–46. (Форма участі – очна).

57. Ковальов А.І., Поклонський В.Г., Отрош Ю.А., Майборода Р.І., Щолоков Е.Е. Розробка моделі для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій // Актуальні проблеми інженерної механіки: матеріали IX Міжнародної конференції, 17–20 травня 2022 року, Одеса: ОДАБА, 2022. С. 101–103. (Форма участі – заочна).

58. Ковальов А.І., Отрош Ю.А., Пурденко Р.Р. Забезпечення вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних колон // Проблеми пожежної безпеки 2022 («Fire Safety Issues 2022»): матеріали Міжнародної науково-методичної конференції. – Харків: НУЦЗ України, 12 жовтня 2022 року. – С. 88–90. (Форма участі – заочна).

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

59. Ковалев А.И. Оценка огнестойкости многопустотных железобетонных перекрытий с огнезащитными покрытиями с помощью расчетно-экспериментального метода. Науковий вісник УкрНДІПБ. 2012. № 2 (26). С.28–34.

Патенти

60. Пристрій для визначення адгезійної міцності покриття / Ковальов А.І., Єлагін Г.І., Кришталь М.А. Пат. 36993 України, МПК G01N 19/02 (2006), заявник та патентовласник Академія пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля МНС України. № u 2008 07962, заявка 12.06.2008, опуб. 10.11.2008, Бюл. № 21.

61. Спосіб визначення температури втрати несучої здатності будівельної конструкції / Отрош Ю.А., Ковальов А.І., Островерх О.О., Удянський М.М., Дивень В.І., Рибка Є.О. Пат. 132449 України, МПК G01N 3/24 (2006.01), заявник та патентовласник Національний університет цивільного захисту України. № u 2018 09788, заявка 01.10.2018, опуб. 25.02.2019, Бюл. №4.

62. Спосіб визначення межі вогнестійкості будівельної конструкції / Отрош Ю.А., Ковальов А.І., Данілін О.М., Рудешко І.В., Гаркавий С.Ф., Рибка Є.О. Пат. 138535 України, МПК G01N 3/24 (2006.01), заявник та патентовласник Національний університет цивільного захисту України. № u 2019 06467, заявка 10.06.2019, опуб. 25.11.2019, Бюл. № 22.

63. Спосіб визначення фактичної межі вогнестійкості будівельних конструкцій експлуатованих будівель та споруд / Отрош Ю.А., Рибка Є.О., Ковальов А.І., Васильченко О.В., Рубан А.В., Петухова О.А., Томенко В.І., Словінський В.К., Пат. 146414 України, МПК G01N 3/24 (2006.01), заявник та патентовласник Національний університет цивільного захисту України. № u 2020 06685, заявка 16.10.2020, опуб. 17.02.2021, Бюл. № 7.

64. Спосіб малоруйнівного визначення температури втрати фактичної несучої здатності будівельної конструкції експлуатованих будівель та споруд / Отрош Ю.А., Рибка Є.О., Рубан А.В., Петухова О.А., Максимова М.О., Ковальов А.І., Томенко В.І., Словінський В.К., Мележик Р.С. Пат. 148340 України, МПК G01N 3/24 (2006.01), заявник та патентовласник Національний університет цивільного захисту України. № u 2021 00862, заявка 23.02.2021, опуб. 28.07.2021, Бюл. № 30.

65. Спосіб визначення несучої здатності вібронавантаженої будівельної конструкції / Отрош Ю.А., Рибка Є.О., Пономаренко Р.В., Ромін А.В., Максимова М.О., Миргород О.В., Ковальов А.І., Черненко О.М. Пат. 149253 України, МПК G01N 3/24 (2006.01), заявник та патентовласник Національний університет цивільного захисту України. № u 2021 03378, заявка 15.06.2021, опуб. 27.10.2021, Бюл. № 43.

66. Методика визначення характеристики вогнезахисної здатності вогнезахисних покривів залізобетонних перекриттів на основі розрахунково-експериментального методу за результатами випробувань на вогнестійкість / Ковальов А.І. А.с. на твір № 77048 від 20.02.2018, заявник та патентовласник Ковальов А.І., заявка № 77912 від 02.02.2018.

АНОТАЦІЯ

Ковальов А.І. Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – «Пожежна безпека» – Національний університет цивільного захисту України, Харків; Національний університет цивільного захисту України, Харків, 2023.

Дисертацію присвячено розв'язанню важливої актуальної наукової проблеми у сфері пожежної безпеки, що полягає у недосконалому методів оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій, шляхом розробки і реалізації розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій з обґрунтованими параметрами та умовами експлуатації вогнезахисних покриттів.

Розроблено математичну модель для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій та на її основі розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій, який відрізняється від наявних ідентифікацією теплофізичних характеристик моделі на основі розв'язання обернених задач теплопровідності за даними випробувань на вогнестійкість, визначенням мінімальної товщини вогнезахисного покриття за результатами випробувань на вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій за різних умов випробувань та значеннях чинників впливу. Розроблено методологічну базу для оцінювання вогнестійкості будівель із вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій шляхом побудови моделей теплового та напружено-деформованого стану будівлі, що відрізняються від тих, що існують, врахуванням наявності та властивостей вогнезахисних покриттів, високотемпературних, силових та кліматичних впливів, сумісної роботи будівельних конструкцій всієї будівлі та дозволяють оцінити вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій, конструктивної системи чи її частини та рівень пожежної безпеки об'єкта в частині забезпечення вогнестійкості і прийняти ефективні рішення щодо підвищення вогнестійкості конструкцій.

Ключові слова: вогнестійкість, метод оцінювання вогнестійкості, вогнезахисні покриття, вогнезахисні будівельні конструкції, температурні режими пожежі, теплофізичні характеристики.

ABSTRACT

Kovalov A.I. Development of the scientific basis of assessing the fire resistance of fireproof reinforced concrete building structures. – Qualified scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 21.06.02 – fire safety. National University of Civil Defense of Ukraine, State Emergency Service of Ukraine, Kharkiv, 2023.

The dissertation is dedicated to the solution of an important current scientific problem in the field of fire safety, which consists in overcoming the imperfection of methods for assessing the fire resistance of building structures, by developing and implementing a calculation-experimental method for assessing the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete building structures with substantiated parameters and conditions of operation of fire-resistant coatings.

Modern methods and approaches to ensuring and assessing the fire resistance of reinforced concrete building structures are analyzed. Ways to increase the level of fire safety of objects during the design, construction and operation of buildings and structures have been identified. It has been established that buildings and structures have insufficient resistance to high temperature, force and climatic influences as a result of not taking into account the most significant factors affecting the fire-resistant properties of coatings in the "building structure – fire-resistant coating" system.

The peculiarities of the influence of the most significant parameters in the "reinforced concrete structure–fireproof coating" system on ensuring the fire resistance of fireproof reinforced concrete building structures, which affect the thermal and stress-strain state of fireproof reinforced concrete structures protected by fireproof coatings, are determined.

A mathematical model has been developed for evaluating the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete structures and, based on it, a calculation-experimental method for evaluating the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete structures, which differs from the existing ones by identifying the thermophysical characteristics of the model based on the solution of inverse problems of heat conduction according to the data of fire resistance tests, by determining the minimum thickness of the fire-resistant coating according to the results of fire resistance tests of fire-resistant reinforced concrete structures under different test conditions and values of influencing factors.

A methodological base has been developed for evaluating the fire resistance of buildings made of fire-resistant reinforced concrete building structures by building models of the thermal and stress-strain state of the building, which differ from those that exist, taking into account the presence and properties of fire-resistant coatings, high-temperature, force and climatic influences, the joint operation of building structures throughout buildings.

Based on the methodological basis, a mathematical model of the building was developed by creating finite-element models of fire-resistant structures with the help of modern software complexes (LIRA-CAD) for computational and experimental evaluation of fire resistance of fire-resistant reinforced concrete building structures. The use of models allows you to simulate the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete building structures, the structural system or its part, and to assess the level of fire safety of the object in terms of ensuring fire resistance and to make effective decisions about increasing the fire resistance of reinforced concrete structures.

The calculated economic effect of the implementation of the developed calculation-experimental method of evaluating the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete building structures in comparison with existing methods. The effect is that the costs of using the calculation-experimental method when evaluating the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete structures (on the example of a parking lot for cars) are 6 times less than the costs when evaluating with the use of the experimental method.

The total amount of economic effect that can be achieved in the case of using the calculation-experimental method of evaluating the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete structures is about UAH 6.8 million. The technical and economic substantiation of the use of fire-resistant reinforced concrete structures with justified thicknesses of fire-resistant coatings was carried out. It has been established that if such a fire prevention measure is used, losses from a fire in a parking lot for cars can be reduced by 15 times.

Key words: fire resistance, fire resistance assessment method, fire-resistant coatings, fire-resistant building structures, fire temperature regimes, thermophysical characteristics.

Підписано до друку ____.02.2024.
Обл-вид. арк 2,85. Ум. друк. арк. 3
Тираж 30 прим. Замовлення № ____/2024.
Черкаський інститут пожежної безпеки
імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України,
18034, м. Черкаси, вул. Онопрієнка, 8