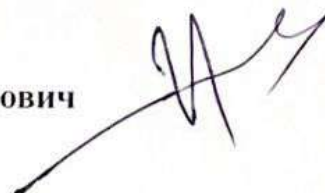


**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ**

НУЯНЗІН Олександр Михайлович



УДК 614.841.334.1

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ
МАЛОГАБАРИТНИХ МОДУЛЬНИХ ВОГНЕВИХ ПЕЧЕЙ**

21.06.02 – пожежна безпека
(261 – пожежна безпека)

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів – 2023

Дисертація є рукописом.

Роботу виконано в Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ДЕМЧИНА Богдан Григорович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
професор кафедри будівельних конструкцій та мостів;

доктор технічних наук, професор
ЄРЕМЕНКО Сергій Анатолійович,
Інституту державного управління та наукових досліджень з
цивільного захисту,
заступник начальника інституту з навчальної роботи;

доктор технічних наук, доцент
ЯКОВЧУК Роман Святославович,
Львівський державний університет безпеки
життєдіяльності,
начальник кафедри цивільного захисту та протимінної
діяльності навчально-наукового інституту цивільного
захисту.

Захист відбудеться о 14⁰⁰ 21 грудня 2023 року на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.874.01 Львівського державного університету безпеки життєдіяльності: вул. Клепарівська, 35, м. Львів, 79007.

Із дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, за адресою: вул. Клепарівська, 35, м. Львів, 79007, а також на сайті спеціалізованої вченої ради Д 35.874.01, за електронною адресою: <https://ldubgd.edu.ua/content/zahisti-disertaciy-2>.

Автореферат розіслано 17 листопада 2023 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 35.874.01
канд. техн. наук



Дмитро КОБИЛКІН

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Державницька позиція задекларує людське життя як найвищу цінність, що спонукає рятувальників до постійного вдосконалення професійної діяльності. Гарантування оптимального часу для евакуації – першорядне завдання, тому будівельні конструкції мають відповідати необхідній межі вогнестійкості. Проводячи пошуково-рятувальну роботу, підрозділи ОРС ЦЗ повинні переконатися в тому, що не відбудеться обвалу внаслідок нагрівання будівельних конструкцій.

У разі пожежі загальна стійкість будівлі порушується через руйнування окремих елементів у каркасі споруди. З огляду на це, одним із важливих аспектів пожежної безпеки стає використання будівельних конструкцій із гарантованою межею вогнестійкості.

На сучасному етапі для визначення меж вогнестійкості застосовують: натурні вогневі випробування, метод випробувань у спеціальних вогневих випробувальних печах, експериментально-розрахункові й розрахункові методи. Варто зауважити, що натурні вогневі випробування не рентабельні, навіть у найбільш розвинених країнах їх проводять надзвичайно рідко. Вогневі випробування й параметри сучасних випробувальних установок не є досконалими, оскільки існують похибки через те, що управління паливною системою та конфігурація вогневих печей не забезпечують повного увідповіднення експериментальних умов із вимогами галузевих стандартів. Крім того, великогабаритні печі – це не екологічно, трудомістко й не завжди економічно доцільно. Розрахункові методи не дають змоги досягти необхідної точності, оскільки неможливо взяти до уваги всі особливості поведінки багатокомпонентного матеріалу будівельних конструкцій у разі нагрівання.

Проблеми оцінювання вогнестійкості залізобетонних конструкцій поставали предметом дослідження в працях багатьох учених (А. Беліков, А. Виноградов, Б. Демчина, С. Єременко, В. Ковалишин, В. Костенко, П. Круковський, В. Ніжник, С. Поздєєв, В. Осипенко, М. Семерак, Р. Яковчук, В. Bartelemi, G. Kruppa, T. Narmathy, T. Lie та ін.). Водночас у наукових дослідженнях бракує уваги щодо обґрунтування специфіки створення системи або універсального експериментально-розрахункового методу оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій, який би зважав на особливості виготовлення несучої залізобетонної будівельної конструкції, умов її подальшої роботи та сприяв точності розрахункових даних. Необхідно досягти консенсусу між експериментами й подальшими розрахунками. Серед актуальних завдань галузі – розроблення спеціальних портативних засобів, які допоможуть брати до уваги особливості багатокомпонентного матеріалу залізобетону й розрахункові методики, що охоплюють відомості про навантаження та габарити конструкцій. Залучення отриманих даних оптимізуватиме ефективність випробувань з оцінювання

вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій для гарантування необхідного часу евакуації та проведення пошуково-рятувальних робіт.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація підготовлена відповідно до основних напрямів наукової діяльності ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України у 2016 – 2020 та 2021 – 2025 роках, згідно з «Угодою про асоціацію між Україною та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами», що ратифікована на підставі Закону України № 1678-VII від 16.09.2014; «Стратегією розвитку системи технічного регулювання на період до 2025 року», затвердженою розпорядженням Кабінету Міністрів України від 22.09.2021 № 1145-р; замовленнями Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям ДСНС України та ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України на науково-дослідні роботи: «Розробка розрахункового методу оцінки межі вогнестійкості будівельних конструкцій кабельних тунелів» (ДР № 00119U001103), «Удосконалення експериментально-розрахункового методу оцінки вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій за результатами випробувань їх малогабаритних фрагментів» (ДР № 0121U109145), виконані за участі здобувача як керівника, а також у захищених дисертаціях Олени Борсук на здобуття ступеня кандидата наук («Удосконалення методу розрахункової оцінки вогнестійкості сталевих балок із вогнезахисним мінераловатним облицюванням») і Тараса Самченка на здобуття ступеня доктора філософії («Дослідження вогнестійкості огорожувальних конструкцій кабельних тунелів за умов реальних пожеж»), де автор був науковим керівником.

Мета й завдання дослідження.

Мета роботи полягає у створенні системи, що об'єднує експериментальні та розрахункові методи оцінки межі вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій з використанням малогабаритних модульних вогневих печей шляхом розкриття закономірностей зміни теплових процесів та напружено-деформованого стану залізобетону під впливом сумісної дії механічних та теплових навантажень в умовах пожеж.

Досягнення сформульованої мети передбачає розв'язання таких **завдань**:

- проаналізувати сучасні підходи до оцінювання вогнестійкості елементів будівельних конструкцій та окреслити актуальні напрями досліджень;
- виявити закономірності зміни температурних полів у перерізах елементів залізобетонних будівельних конструкцій в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі, обґрунтувати на основі зазначених закономірностей методики визначення температурних розподілень за результатами точкових вимірювань температури у внутрішніх шарах елементів цих конструкцій за умов теплового впливу пожежі;
- розробити й обґрунтувати методику експериментальних досліджень системи оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій, що полягає в визначенні температурного відклику цих конструкцій у разі

нагрівання; створити експериментальне обладнання (малогабаритну вогневу установку з описаними конструктивними параметрами);

– розробити й обґрунтувати методику експериментального етапу системи оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій, що полягає в дослідженні температурного відклику цих конструкцій у разі нагрівання, створити експериментальне обладнання (малогабаритну вогневу установку з описаними конструктивними параметрами);

– за розробленими методиками загальної системи провести експериментальні дослідження фрагментів елементів залізобетонних будівельних конструкцій, вивчити адекватність отриманих результатів;

– на підставі отриманих експериментальних даних визначити температурні розподілення в перерізах елементів залізобетонних будівельних конструкцій та дослідити їхню адекватність;

– розробити методику обчислення несучої здатності несучих елементів залізобетонних будівельних конструкцій за результатами обчислення температурних розподілів у перерізах досліджуваних елементів;

– об'єднати розроблені методики в систему з оцінювання вогнестійкості елементів несучих залізобетонних будівельних конструкцій під час використання малогабаритних печей (експериментального обладнання) та розрахункової частини оцінювання вогнестійкості на основі експериментальних даних.

Об'єкт дослідження – процеси нагрівання та деформації елементів залізобетонних будівельних конструкцій у ході дослідження їхньої вогнестійкості, а також технологічні методи її оцінювання.

Предмет дослідження – технологічний процес визначення вогнестійкості будівельних конструкцій на основі випробування малогабаритних фрагментів у модульних вогневих печах та екстраполяція результатів у конструкціях реальних розмірів.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження проведено на основі систем диференціальних рівнянь неперервних середовищ типу рівнянь Нав'є – Стокса, рівнянь теплопровідності та напружено-деформованого стану залізобетону в умовах нагріву під час пожежі, рівнянь теплопровідності Фур'є. Для розв'язування рівнянь у роботі використано метод кінцевих (граничних) елементів, метод кінцевих різниць, оптимізаційні методи, а також методи статистичного оброблення експериментальних і розрахункових даних. Експериментальні дослідження виконано за допомогою створеної універсальної малогабаритної вогневої випробувальної установки.

Наукова новизна отриманих результатів. Унаслідок дослідницького пошуку запропоновано нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності забезпечують вирішення актуальної проблеми гарантування нормативного часу межі вогнестійкості будівельних конструкцій під впливом температурного режиму пожежі через розроблення нової експериментально-розрахункової системи її оцінювання з використання модульних малогабаритних вогневих

печей. Наукова новизна аргументована описом закономірностей відтворення температурних полів та розрахунку на їхній основі міцності стиснених елементів несучих залізобетонних будівельних конструкцій за спільного температурно-силового впливу на основі експериментальних випробувань їхніх фрагментів у компактних вогневих печах.

Здобувачем уперше:

1) науково обґрунтовано й розроблено експериментально-розрахункову систему оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій, що бере до уваги спільну дію силових і температурних навантажень, завдяки поєднанню експериментальних досліджень із температурного впливу на фрагменти елементів цих конструкцій у спеціальній універсальній малогабаритній модульній вогневій установці та розрахункових методик інтерпретації експериментальних результатів, математичних моделей, що описують напружено-деформований стан несучих залізобетонних будівельних конструкцій під впливом стандартного температурного режиму пожежі, охоплюють реальні розміри конструкцій;

2) методами математичного моделювання виявлено закономірність та визначено залежності закономірності залежності дисперсії температур у камері вогневої печі (S^2) від об'єму її камери (V), відстані від пальників до поверхні досліджуваного фрагменту несучої залізобетонної будівельної конструкції (l) та висоти, на якій розташований отвір для виходу продуктів горіння (h) у вигляді:

$$S^2 = 4221 + 4133 \cdot h - 2555 \cdot l - 1220 \cdot V - 800 \cdot V \cdot l - 5513 \cdot V \cdot h - 5150 \cdot l \cdot h + 7875 \cdot V \cdot l \cdot h.$$

Це вможливило обґрунтування конфігурації універсальної малогабаритної модульної вогневої печі для проведення випробувань, також експериментально встановлено, що дисперсія температур по обігрівальній поверхні всіх основних типів несучих залізобетонних будівельних конструкцій під час нагрівання за стандартним температурним режимом має екстремум. Більш інтенсивною зміна градієнта температур у камері печі є на початкових етапах дослідження та характеризується плавним підвищенням її після 30 хвилин випробувань;

3) теоретично обґрунтовано раціональний спосіб установа та комбінації засобів вимірювальної техніки всередині камери малогабаритної печі, що, на відміну від наявних установок, може універсально вимірювати температуру нагрівання камери без необхідності зміни місця дислокації під час випробування різних видів фрагментів несучих залізобетонних будівельних конструкцій, забезпечує менше на 40 % використання термопар.

Удосконалено:

1) обчислювальні алгоритми інтерполяції для відновлення температурних полів у несучих залізобетонних будівельних конструкціях за показниками температури в певних точках усередині конструкцій під час вогневих випробувань, що дає змогу запропонувати більш ефективну схему розташування термопар у перерізах фрагментів несучих залізобетонних будівельних конструкцій;

2) підходи щодо проведення розрахунків з оцінювання вогнестійкості, що дає змогу визначати вогнестійкість більш точно у порівняно з наявними методами, завдяки використанню результатів експериментальних досліджень з нагрівання фрагментів елементів залізобетонних конструкцій у малогабаритних вогневих печах.

Набули подальшого розвитку такі положення:

1) застосування експериментально-розрахункових методів шляхом врахування зміни напружено-деформованого стану залізобетону під впливом сумісної дії механічних та теплових навантажень, за рахунок поєднання експериментальних досліджень фрагментів несучих залізобетонних будівельних конструкцій у малогабаритних вогневих печах та перенесення результатів на реальні розміри навантажених елементів за допомогою розрахунків;

2) експериментально-розрахункові підходи щодо оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій без використання механічного навантаження в процесі проведення випробувань у малогабаритних вогневих печах.

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність досліджень полягає в розробленні експериментально-розрахункової системи оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій через поєднання вогневих випробувань у модульних малогабаритних установках без навантаження та проведення розрахункових методик, що має меншу вартість і трудомісткість, на відміну від наявних методів.

Розроблені методики експериментів та розрахунків, що входять у загальну систему є підґрунтям для створення нормативного забезпечення для оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій за допомогою експериментально-розрахункових методів.

Створено модульну малогабаритну вогневу установку для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції. Розроблено та інтегровано в установку прототип модуля аналого-цифрового перетворення (АЦП) сигналу термопар. Модуль побудовано на базі мікросхеми max. 31855, що дає змогу перетворювати аналоговий цифровий сигнал від 18 термопар на цифровий із максимальним значенням температури до 1350 °С.

Розроблено та сконструйовано систему засобів нагрівання внутрішнього простору камери печі й досліджуваних фрагментів залізобетонних будівельних конструкцій, що, на відміну від наявних установок, використовує метан як паливо, отже, знижує вартість вогневих випробувань, а також уможливорює більшу екологічність.

Результати дослідження впроваджено в:

– діяльність ТОВ «Інженерно-проектно-виробнича компанія «Спецзахист» – розроблено й запропоновано низку новацій для оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій; пропозиції щодо вдосконалення стосуються поєднання експериментальних і розрахункових

методів визначення вогнестійкості, здатні зменшити затрати, порівняно з випробуваннями вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій (акт упровадження від 14.02.2023);

– у роботу ТОВ «Тест», оскільки отримані результати доцільно використовувати під час проєктування та будівництва нових установок для випробування вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій, для досягнення в камерах печей однорідності температурного поля на обігрівальних поверхнях конструкцій, для підвищення ефективності випробувань щодо вогнестійкості (акт упровадження від 20.02.2023);

– у діяльність ТОВ «Атоменергоресурс» – створено систему, що поєднує експериментальні дослідження та розрахунки для екстраполяції результатів на реальні об'єкти (акт упровадження від 22.02.2023);

– у наукову діяльність Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту через застосування отриманої методичної бази з оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій без використання механічного навантаження в процесі вогневих випробувань (акт упровадження від 27.02.2023);

– у роботу дослідно-випробувальної лабораторії аварійно-рятувального загону спеціального призначення ГУ ДСНС України у Черкаській області через застосування експериментально-розрахункових методик, систематизованих у дисертації, під час оцінювання вогнестійкості несучих елементів залізобетонних будівельних конструкцій (акт упровадження від 10.03.2023);

– в освітній процес Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, що підтверджує актуалізований характер освіти та високий науково-методичний рівень викладання дисциплін, оптимізує якість лекційних і практичних занять для здобувачів вищої освіти (акт упровадження від 27.03.2023).

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджені використанням відомих систем диференційних рівнянь тепломасообміну й напружено-деформованого стану (НДС) для несучих залізобетонних будівельних конструкцій в умовах нагріву під час пожежі, що апробовані чисельними методами інтегрування математичних моделей тепломасообміну та НДС, а також задовільною збіжністю розрахункових й експериментальних даних, отриманих під час нагрівання фрагментів несучих залізобетонних конструкцій.

Особистий внесок здобувача аргументований обґрунтованою актуалізацією науково-прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки, самостійним формулюванням мети й завдань, об'єкта та предмета дослідження, аналізом вітчизняних і закордонних джерел, удосконаленням та розробленням дослідницьких методів і методик, проведенням експериментальних досліджень, а також обробленням отриманих результатів, систематизованим підбиттям

підсумків. Дисертація є самостійною роботою автора; усі положення, запропоновані до захисту, результати їх упровадження описано в працях [1–69].

У наукових розвідках, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача такий: [1] – експериментальні випробування з моделювання температурних режимів реальних пожеж у будівлях спеціального призначення, а також створено науково-обґрунтовану послідовність процедур з детальним вибором обладнання та зразків для випробувань з метою забезпечення достовірних експериментальних даних при дослідженні температурного режиму пожежі у закритих об'ємах; [2] – дослідження впливу небезпечних факторів пожежі на будівельні конструкції; опис на основі комп'ютерного моделювання впливу стандартного температурного режиму пожежі (за умов випробувань вогнестійкості) на несучі будівельні конструкції, а також розрахована відносна похибка між розрахунковими та експериментальними даними. Критерії Кохрена, Стюдента та Фішера для результатів розрахунку температури у сталевих конструкціях із вогнезахисним мінераловатним облицюванням між розрахунковими та експериментальними даними мають величини, що не перевищують табличних значень; [3] – дослідження процесів тепломасообміну в камері вогневої печі, визначення параметрів внутрішнього простору, що суттєво впливають на температурний режим під час випробувань вогнестійкості; [4] – наукове обґрунтування можливості створити вогневу установку з параметрами, які забезпечать вищу екологічність проведення випробувань у порівнянні з великогабаритними печами; перевірено адекватність роботи запроєктованої установки методом комп'ютерного моделювання, а також доведено, що доцільно застосовувати природній газ у якості палива; [5] – моделювання поведінки будівельних конструкцій газгольдера за умови виникнення теплового потоку пожежі від сусіднього об'єкта; [7] – опис етапів будівництва й науково обґрунтована конфігурація малогабаритної вогневої випробувальної установки; [8] – аналіз моделей теплообміну, що можна використовувати для дослідження процесів усередині камер вогневих печей під час випробування вогнестійкості несучих стін; [9] – характеристика способу впливу конструктивних особливостей камери печі на остаточний результат межі вогнестійкості; [10] – створення й характеристика тематичних моделей, які доцільно використовувати для дослідження тепломасообміну в камерах вогневих печей; [11] – зіставлення результатів оцінювання вогнестійкості несучих стін у разі рівномірного й нерівного прогрівання засобами комп'ютерної газодинаміки; [12] – обчислювальний експеримент з оцінювання рівномірності температурного поля по обігрівальній поверхні залізобетонних стін під час випробувань вогнестійкості в спеціальних установках; [13] – опис алгоритму створення комп'ютерних моделей вогневих печей, за допомогою яких досліджено вплив дисперсії температур по обігрівальній поверхні будівельних конструкцій на значення межі вогнестійкості; [14] – порівняльний аналіз здатності різних конфігурацій і дизайнів вогневих печей забезпечувати відтворюваність результатів випробувань

вогнестійкості; [15] – аналіз отриманих результатів відповідно до моделювання процесу прогрівання в замкнених системах у разі дії зовнішніх чинників; [16] – дослідження впливу величини пожежного навантаження на температурний режим, що виникає в приміщеннях обмеженого об'єму; [17] – вивчення температурних режимів пожежі, що створюють у кабельних тунелях із різними геометричними параметрами, з'ясування впливу на значення межі вогнестійкості огорожувальних конструкцій, а також підготовка та проведення експериментальних досліджень для опису температурних режимів пожежі в закритих приміщеннях тунельного типу; обґрунтування факторів, що найсуттєвіше впливають на значення межі вогнестійкості будівельних конструкцій; [18] – окреслення чинників, які найбільшою мірою позначаються на температурному режимі пожежі в закритих приміщеннях тунельного типу; [19] – порівняння ефективності роботи комп'ютерних моделей, що імітують тепломасообмін у камерах печей та створені за допомогою різних програмних комплексів CFD; [20] – демонстрування алгоритму й особливостей моделювання моменту втрати несучої здатності балки; [21] – опис нагрівання будівельної сталі за умов стандартного температурного режиму пожежі; [22] – дослідження ступеня впливу коефіцієнта перерізу й коефіцієнта навантаження несучої балки на час відшарування вогнезахисного облицювання; [24] – доведення доцільності розрахункового оцінювання класу вогнестійкості будівельних конструкцій, демонстрування алгоритму його використання; [26] – розроблено та охарактеризовано алгоритм оцінки межі вогнестійкості залізобетонної балки за результатами вогневих випробувань без механічного навантаження, що лягає в основу загальної методики оцінки межі вогнестійкості залізобетонної балки за результатами вогневих випробувань без механічного навантаження та врахування його на етапі розрахунку; [27] – представлення конфігурації камери вертикальної вогневої печі, що забезпечує рівномірний прогрів стін під час дослідження вогнестійкості; [28] – презентація результатів конфігурації універсальної малогабаритної вогневої установки, використовуваної в експериментальних дослідженнях; [29] – презентація результатів способу інтерполяції температурних розподілень у залізобетонних балках на основі вимірювань температури у визначених контрольних точках; [30] – окреслено фактори, що впливають на результати, отримані в ході оцінювання вогнестійкості конструкцій; проведення експерименту, аналіз результатів; [31] – опис комп'ютерних моделей вогневих печей і результатів оцінювання межі вогнестійкості несучих стін у моделях; [32] – перевірка адекватності створених моделей печей за допомогою методів математичної статистики та критеріїв; [33] – створення математичних моделей тепломасообміну в разі пожеж у спорудах тунельного типу й перевірка їхньої адекватності; [34] – опис методики та результатів реальних експериментів із нагрівання залізобетонної стіни в малогабаритній вогневій печі; [35] – аналіз нормативних документів України в галузі метрології; [36] – з'ясування залежності значення межі вогнестійкості залізобетонних плит від величини дисперсії

температур під час нагрівання у вогневих печах; [37] – визначення критеріїв адекватності для верифікації математичних моделей; [38] – порівняння різних конфігурацій камер вогневих печей; [39] – обґрунтування вибору вимірювальних приладів, що доцільно застосовувати для випробування вогнестійкості несучих стін; [40] – виклад алгоритму обчислюваного експерименту; [41] – вивчення рівномірності прогріву несучої стіни за різних умов; [42] – створення математичної моделі прогріву залізобетонної стіни та проведення обчислювального експерименту; [43] – дослідження рівномірності прогріву несучої стіни з важкого бетону; [44] – з'ясування особливостей тепломасообміну в камерах вогневих печей за допомогою комп'ютерного моделювання; [45] – аналіз ефективності роботи різних конфігурацій вогневих печей; [46] – розроблення кінцево-елементної моделі залізобетонної стіни та проведення обчислювального експерименту; [47] – аналіз результатів прогрівання горизонтальної вогневої печі; [48] – математичне моделювання, що вможливило вивчення впливу різних конфігурацій печей на значення вогнестійкості несучих стін; [49] – визначення реальних температурних режимів пожеж залежно від зовнішніх умов і пожежного навантаження; [50] – осмислення вимог нормативних документів у сфері вогнестійкості будівельних конструкцій; [51] – створення комп'ютерних моделей, що відображають прогрів і зміну несучої здатності несучих стін у разі нерівномірного прогріву; [52] – аналіз математичних моделей, які доцільно використовувати для дослідження тепломасообміну під час пожежі, характеристика негативних наслідків таких умов нагрівання; [53] – математичне моделювання впливу різних температурних режимів пожежі на несучу сталеву балку; [54] – підготовка зразків залізобетонних колон для зістарення в кліматичній камері; [55] – вивчення математичних моделей камер вогневих печей щодо їхньої рівномірності прогріву; [56] – створення математичної моделі сталевий балки та проведення обчислювального експерименту; [57] – розроблення прямокутних моделей закритих тунелів, моделювання горіння, що вможливили формування уявлень про аеродинаміку закритих прямокутних приміщень у разі появи теплових потоків унаслідок пожежі; [58] – вивчення поведінки сталевих стержнів за впливу стандартного температурного режиму пожежі, а також комп'ютерне моделювання поведінки несучих будівельних конструкцій стержневого типу (за різними геометричними й фізичними параметрами) під час їх нагрівання; [59] – алгоритмізація комп'ютерних моделей вогневих печей за допомогою сучасних програмних комплексів; [60] – опис результатів експериментальних досліджень нагрівання фрагменту залізобетонної конструкції; [61] – представлення результатів нагрівання залізобетонної плити; [62] – з'ясування особливостей прогрівання сталевих стержнів; [63] – виклад конструктивних особливостей малогабаритної вогневої установки для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції; [64] – аналіз експериментальних даних щодо нагрівання залізобетонної балки за умов пожежі; [65] – розрахунок адекватності результатів обчислювальних експериментів прогрівання сталевих стержнів; [66] – аналіз

адекватності результатів обчислювальних експериментів прогрівання залізобетонних стін; [67] – представлення результатів експериментальних досліджень із нагрівання елементів залізобетонної стіни; [68] – аргументація максимальних значень навантаженої вертикальної будівельної конструкції без вогнезахисту в умовах пожежі, доведення необхідності ізоляції сталі від прямої дії вогню; [69] – проведення реального експерименту з нагрівання малогабаритного фрагменту стіни за стандартним температурним режимом пожежі, аналіз отриманих результатів. Праці [6; 23; 25] підготовлені самостійно.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень представлено й успішно обговорено на міжнародних і національних науково-практичних конференціях: Всеукраїнська науково-практична конференція рятувальників «Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку» (м. Київ, 2014, 2015, 2016, 2017); Міжнародна науково-практична конференція «Надзвичайні ситуації безпека та захист» (м. Черкаси, 2014, 2015, 2016, 2020, 2021, 2022); VII Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку забезпечення безпеки життєдіяльності» (м. Львів, 2015); Міжнародна науково-практична конференція «Прикладні аспекти техногенно-екологічної безпеки» (м. Харків, 2015); Міжнародна науково-практична конференція «Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації» (м. Львів, 2016); VII Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 2017); XVIII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering, production engineering and physics» (Czestochowa, 2017); Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2017, 2018, 2021, 2022); Міжнародна науково-практична конференція «Енергоефективність на транспорті» (м. Харків, 2020); 9-та Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (м. Харків, 2021); International Scientific and Practical Conference «Problems of Emergency Situations» (Kharkiv, 2021, 2022).

Публікації. Основні положення й наукові результати дисертації викладено в 69 опублікованих працях, серед яких: 4 статті, проіндексовані у базах даних «Web of Science Core Collection» та / або «Scopus»; 3 статті в наукових періодичних виданнях інших держав; 19 статей, що входять до переліку наукових фахових видань України; 3 статті іншого характеру; 3 патенти на корисну модель; 2 монографії; 38 матеріалів конференцій різного рівня та наукової специфіки.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел (328 найменувань). Обсяг дослідження – 418 сторінок друкованого тексту (із них 321 сторінка основного тексту). У роботі підготовлено 36 таблиць, 212 рисунків, 3 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність задекларованої теми; сформульовано мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження; аргументовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів; представлено відомості щодо апробації; описано характер публікацій.

У першому розділі «**Переваги й недоліки сучасних підходів до оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій**» проаналізовано сучасні підходи до оцінювання вогнестійкості елементів будівельних конструкцій та окреслено актуальні наукові напрями. Схарактеризовано переваги й недоліки підходів до оцінювання вогнестійкості. Використання фрагментів зразків для випробувань за допомогою експериментальних методів аргументувало необхідність додаткового розрахунку реальних розмірів конструкцій. У разі застосування розрахункових методів неможливо охопити всі особливості виготовлення конструкцій та специфіку матеріалів, що входять до складу залізобетону. Серйозним недоліком є відсутність єдиних вимог до експериментального обладнання. Для реалізації режиму випробувань необхідно зважати на граничні ефекти: тертя торців зразків, вплив тріщинуватої структури зразка, вплив нерівномірності нагріву та ін.

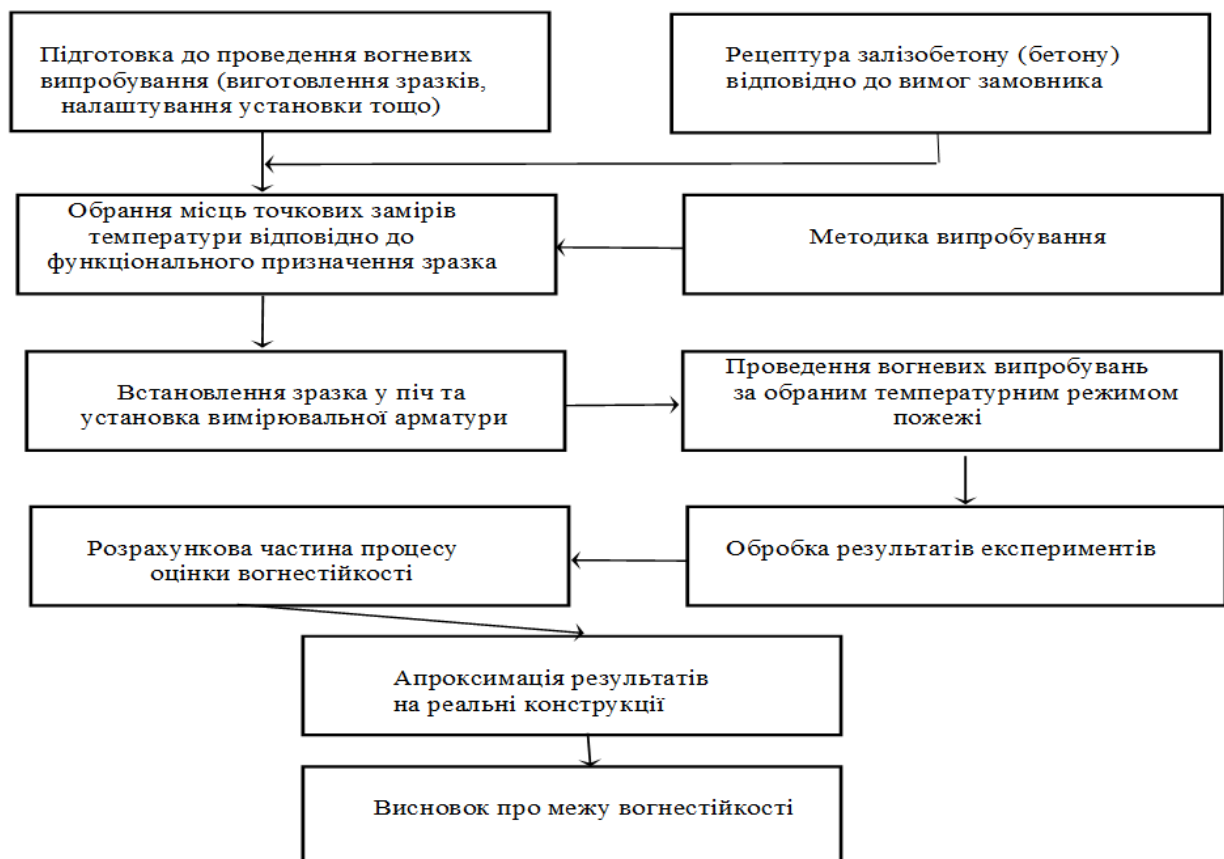


Рисунок 1 – Загальна схема розв’язання загальної проблеми через розроблення й наукове обґрунтування нової експериментально-розрахункової системи оцінювання вогнестійкості

Запропоновано новий експериментально-розрахунковий метод прогнозування вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій. Доведено доцільність поєднання експериментальної та розрахункової частин. Експериментальна частина має на меті оцінити матеріал, із якого виготовлено конструкцію, та особливості її розміщення в майбутній споруді. Розрахункова частина покликана проаналізувати майбутні силові навантаження, з огляду на отримані експериментальні дані. У такий спосіб можна досягнути точності розрахунку, зважаючи на розміри й умови роботи залізобетонної конструкції в будівлі.

На підставі досліджень, описаних у розділі 1, зроблено висновок про доцільність розроблення й наукового обґрунтування нової експериментально-розрахункової системи оцінювання вогнестійкості. Загальна схема розроблення представлена на рис. 1 та вможливорює поетапне виконання завдань.

Наявні підходи до оцінювання не є універсальними й мають суттєві недоліки. Необхідно виявити закономірності зміни температурних полів у перерізах елементів залізобетонних будівельних конструкцій в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі, обґрунтувати методики визначення температурних розподілів за результатами точкових вимірювань температури у внутрішніх шарах елементів цих конструкцій за умов теплового впливу пожежі, а також розробити спеціальну установку для з'ясування точкових значень, необхідних для проведення розрахунків. Крім того, потрібно систематизувати отримані результати на різних етапах дослідження та створити систему оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій, що бере до уваги спільну дію механічного й теплового навантаження, сприяє розв'язанню проблеми гарантування нормативного часу вогнестійкості під впливом температурного режиму пожежі.

Результати, отримані під час досліджень та описані в розділі 1, опубліковано в наукових працях [5; 8; 15–18; 30; 33; 35; 49].

У другому розділі «**Апроксимація температурних розподілів точкових замірів температури в елементах будівельних конструкцій під час оцінювання вогнестійкості**» досліджено закономірності зміни температурних полів у перерізах несучих залізобетонних будівельних конструкцій, обґрунтовано схеми інтерполяції температурних розподілів для основних несучих будівельних конструкцій. Підсумовано, що вони є ключовим переходом від точкових замірів у ході експериментів і відтворення загальної картини під час розрахунку, а також об'єднують систему в одне ціле. Окреслено умови для того, щоб розрахункові дані відтворювали результати, отримані внаслідок реального нагріву конструкцій.

Схарактеризовано низку підходів до інтерполяції загальної кривої прогріву на основі точкових даних. Зауважено, що різновиди несучих залізобетонних конструкцій прогриваються під час пожеж і досліджень із вогнестійкості неоднаково.

Для розв'язування теплотехнічної задачі найчастіше використовують підхід, за якого теплофізичні характеристики матеріалів несучих стін і плит є температурними залежностями, комплексно описують усі складні фізико-хімічні процеси, що відбуваються в цих матеріалах у разі нагрівання.

Процес нагріву супроводжуваний випаровуванням, конденсацією та фільтрацією вологи в рідкому й газоподібному станах. Теплофізичні характеристики не мають прямого фізичного змісту, їх називають ефективними. Водночас цей підхід уможливує достатньо точні результати, тому набув поширення. В аналізованому випадку рівняння теплопровідності називають квазілінійним і записують у вигляді:

$$c_p(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda(T)\nabla T) \quad (1),$$

де $\lambda(T)$, $c_p(T)$, $\rho(T)$ – коефіцієнт теплопровідності, питома теплоємність і густина, залежні від температури прогрівання внутрішнього шару конструкції.

Отвори в несучих елементах помітно послаблюють їхній переріз. З огляду на це варто висловити припущення, що результати вимірювань деформацій і переміщень елементів під час випробувань можуть бути спотворені.

Згідно з іншим підходом до розрахунку температури всередині несучого будівельного елемента, ідеться про інтерполяцію температурних полів у перерізі без проміжкових вимірювань за результатами вимірювання температури тільки на поверхнях елемента – обігрівній та необігрівній. Такого результату досягають через заміну в моделі теплопередачі ГУ III роду на ГУ I роду. Результати вимірювання температури можуть бути використані як граничні умови для завдання.

У межах поставленого завдання граничні умови на обігрівній поверхні стінового елемента записано у вигляді:

$$T|_{x=b} = T_w \quad (2).$$

На необігрівній поверхні стіни вираз (1.6) ГУ III роду має такий вигляд:

$$T|_{x=0} = T_n \quad (3),$$

де T_w , T_n – середні значення температур на обігрівній і необігрівній поверхнях у контрольні моменти часу. Ці дані отримують протягом випробувань за показниками термопар, згідно з методикою випробувань, що описана в нормативних документах. Для розв'язування теплотехнічної задачі запропоновано застосовувати теплофізичні характеристики, рекомендовані в єврокодах.

Недолік описаного підходу пов'язаний із тим, що для розв'язування задачі теплопровідності потрібно окремо добирати просторовий і часовий кроки. Автоматичне добирання кроків ускладнене великими стрибкоподібно змінними значеннями теплоємності й теплопровідності матеріалів елементів з одностороннім прогрівом. Для практичної реалізації розрахунку варто використовувати номограмний метод або спрощені моделі, якщо їхня точність достатня. У кожному конкретному випадку це необхідно перевіряти.

На рис. 2 подано розрахункові схеми залізобетонного ригеля з візуальним відображенням сторін нагріву під час пожежі та в разі випробувань за стандартним температурним режимом.

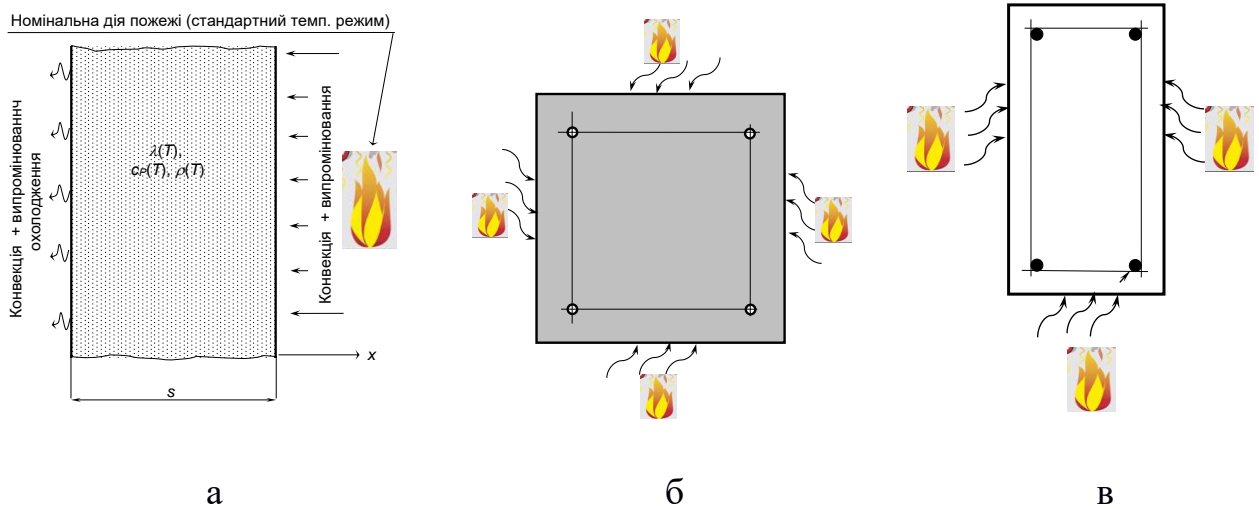


Рисунок 2 – Схеми теплового впливу на несучі будівельні конструкції:
а – на стіни та плити; б – на колони; в – на балки.

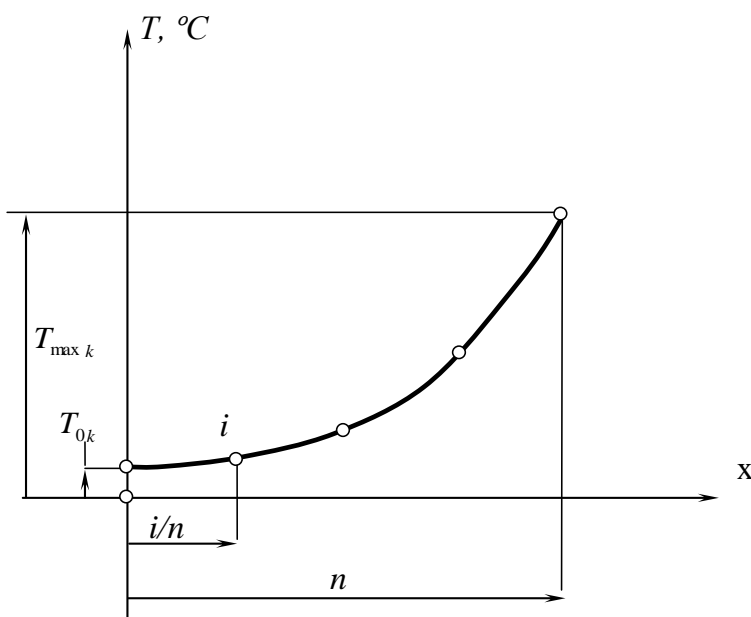


Рисунок 3 – Схема апроксимації температурних розподілів стін під час випробувань вогнестійкості

висловлено припущення, що криві температурних розподілів усередині несучих конструкцій можуть бути афінними.

На рис. 3 та рис. 4 представлено загальну схему апроксимації температур за окремими вузловими точками, а також алгоритм визначення показника ступеня апроксимувального поліному.

Під час інтерполяції потрібно зважати на умови нагріву й тепловіддачу елемента. Зокрема, у разі використання номограмного методу температурні розподілення представлені афінними кривими, що описують подібними функціоналами, де відрізняються тільки значення параметрів. На підставі аналізу результатів емпіричних і розрахункових досліджень, які відображені в багатьох наукових працях,

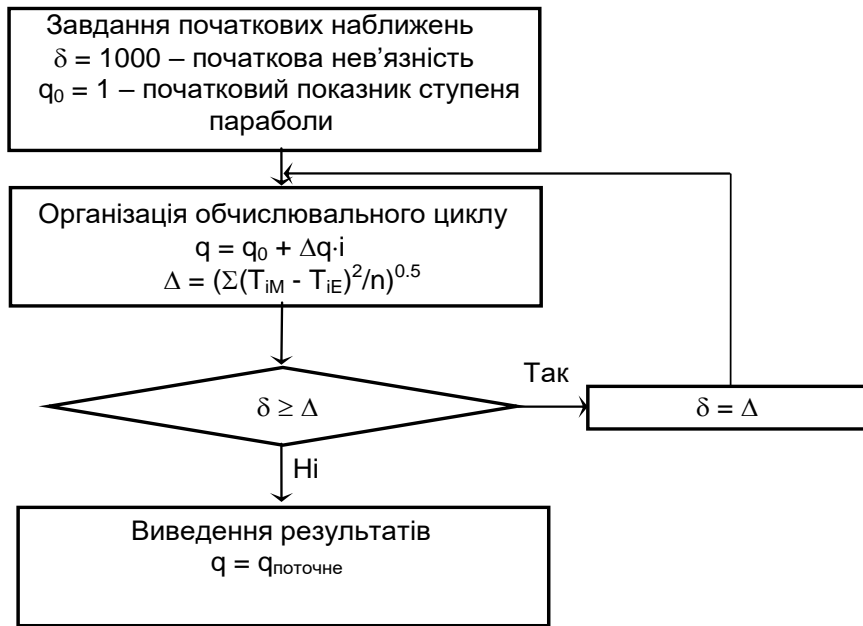


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритму визначення показника ступеня апроксимувального поліному

Для апроксимації застосовано алгоритм, базований на представленні температурних кривих узагальненим виразом:

$$T_{k,i} = T_{0k} + (T_{\max k} - T_{0k}) \left[\frac{i}{n} \right]^{Q_k} \quad (4),$$

де $T_{k,i}$ – температура i -тої точки перерізу стіни (див. рис. 3) у k -тий момент часу; T_{0k} , $T_{\max k}$ – температура першої та останньої точок у

k -тий момент часу; n – кількість інтервалів між контрольними точками; Q_k – показник ступеня параболы у k -тий момент часу, що визначають за алгоритмом.

Аналогічний вираз доцільно використовувати для апроксимації розподілів температур не тільки стін і плит, а й у колонах та балках.

Визначаючи апроксимувальний вираз типу (2.18), добирають оптимальний показник ступеня параболы q через мінімізацію середньоквадратичної нев'язності:

$$Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \sum [T_{iM} - T_{iE}]^2 \rightarrow \min \quad (5),$$

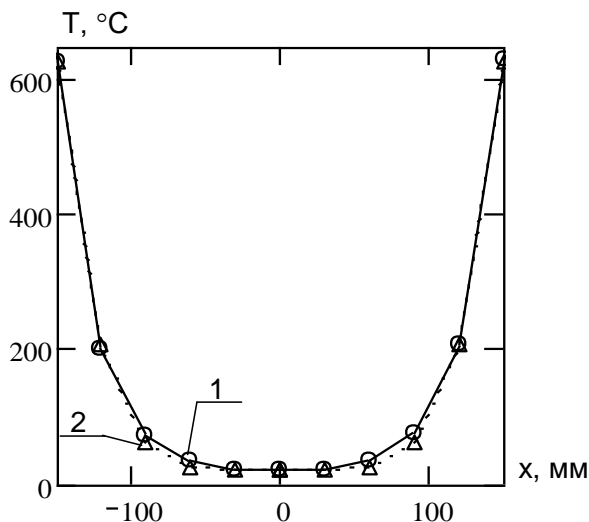


Рисунок 5 – Результати апроксимації температурного розподілення для моменту часу 30 хв. дії «стандартної» пожежі: 1 – експериментальні дані; 2 – результати апроксимації

де m – кількість просторово-часових контрольних точок; T_{iE} , T_{iM} – експериментальне та модельне значення температури в i -тій просторово-часовій контрольній точці.

Для перевірки гіпотези щодо можливості застосування афінних кривих порівняно результати реальних експериментів та розрахунків графіки (рис. 5). засвідчують зівставлення отриманих даних.

Адекватність отриманих даних визначено за кількома критеріями, а також через обчислення абсолютного й відносного відхилення. Запропонований спосіб апроксимації експериментальних даних дає змогу отримувати адекватні дані, оскільки в усіх випадках F-критерій адекватності має істотно нижчі значення за табличні.

За результатами проведених досліджень, обґрунтовано й систематизовано обчислювальні алгоритми інтерполяції для відновлення температурних полів в основних несучих залізобетонних будівельних конструкціях за показниками температури у визначених точках усередині конструкцій під час вогневих випробувань. Підтверджено необхідний рівень достовірності результатів через порівняння розрахунків за різними методами інтерполяції температур для основних видів несучих залізобетонних конструкцій. Відсоток похибки щодо експериментальних даних становить для стін і плит – 14 та 4 %; для колон – 10,2; 5,8 та 4,4 %; для балок – 17 та 11 % у разі використання різних підходів.

Результати, отримані під час досліджень, описано в розділі 2 та опубліковано в наукових працях [18–23; 29, 31; 54–58; 65].

У третьому розділі **«Дослідження закономірностей впливу конструктивних параметрів печі на теплові процеси під час вогневих випробувань будівельних конструкцій»** обґрунтовано параметри камери вогневої печі та розміщення її ключових елементів. Виявлено закономірності залежності дисперсії температур у камері вогневої печі від об'єму її камери, відстань від пальників до поверхні досліджуваного фрагменту несучої залізобетонної будівельної конструкції та висоти, на якій розташований отвір для виходу продуктів горіння.

Для отримання даних прогрівання несучих залізобетонних конструкцій у конкретних точках необхідно створити пристрій для проведення експериментальних досліджень. На сьогодні використовують лише великогабаритні печі, які не здатні забезпечити вимоги до навантажень та випробування конструкцій реальних розмірів. Немає жодної необхідності працювати з величезними установками, тому створено універсальну малогабаритну вогневу установку, яка спроможна забезпечити умови для рівномірного прогріву конструкцій. У подальшому виконано розрахунки за отриманими даними.

На першому етапі розроблено алгоритм створення комп'ютерної моделі вогневої печі з факельним горінням. Усього підготовлено 10 конфігурацій, що відрізняються геометричними параметрами камери (ширина, глибина, висота), кількістю пальників (від 2 до 4), кількістю та розташуванням отворів для відведення продуктів горіння (від 1 до 2).

Проведено комп'ютерне моделювання засобами CFD. Математичний апарат для розроблення моделей вогневої печі з метою випробувань фрагментів залізобетонних будівельних конструкцій базований на використанні повної системи рівнянь Нав'є – Стокса та газового палива, розрахунок горіння якого можливо проводити за моделями Зельдовича або Магнусена.

На рис. 6 представлено загальний концепт геометричних конфігурацій вогневих печей, що створені в програмному комплексі FDS.

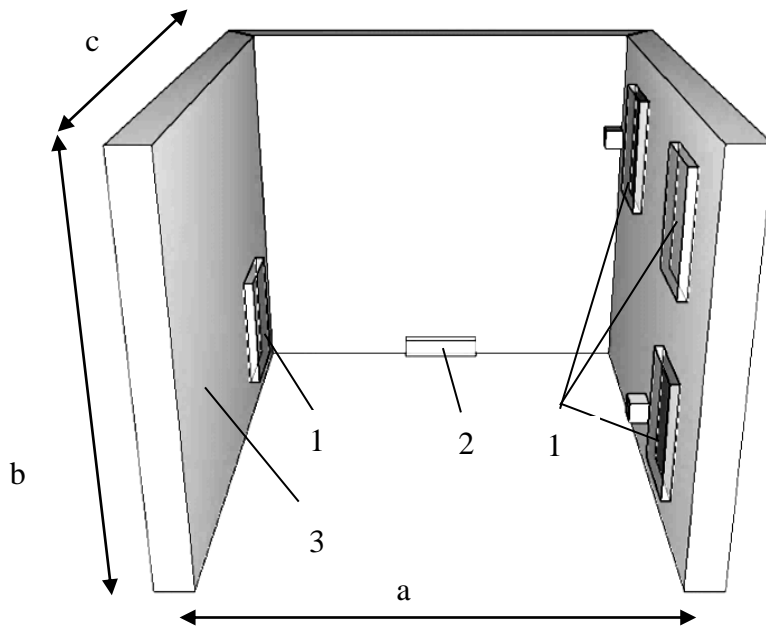


Рисунок 6 – Загальний вигляд конфігурацій вогневих печей: 1 – пальники та отвори для входу повітря, 2 – місця розташування отворів(у) для виходу продуктів горіння, 3 – П-подібне огороження камери печі

На підставі результатів досліджень сформульовано гіпотезу, що дисперсія температур по обігрівальній поверхні фрагментів залізобетонних конструкцій має лінійну залежність від найбільш значущих параметрів. Найбільш значущі параметри: об'єм камери V (м³), відстань до пальників l (м), а також висота розташування отвору для відведення продуктів горіння h (м). З огляду на гіпотезу лінійної залежності, її математична модель може бути побудована на основі регресії:

$$S^2 = p_0 + p_1x_1 + p_2x_2 + p_3x_3 + p_4x_1x_2 + p_5x_1x_3 + p_6x_2x_3 + p_7x_1x_2x_3 \quad (6),$$

де $p_0, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7$ – коефіцієнти регресії.

Коефіцієнти регресії (6) обчислено на основі 8 числових експериментів. Числові експерименти проводять за простим ортогональним планом, що у відповідний із матрицею плану, яка подана нижче у вигляді табл. 1.

Таблиця 1 – Матриця плану повного факторного числового експерименту

№	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	-	+	-	-	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	-	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+	+	-

У табл. 2 представлено границі діапазонів, у яких змінюються зазначені фактори під час числового повного факторного експерименту для побудови математичної моделі залежності дисперсії температур від описаних вище параметрів.

Таблиця 2 – Інтервали варіювання факторів у чисельному експерименті

Об'єм камери V , м ³			Відстань до пальників l , м			Висота розташування отвору для відведення продуктів горіння h , м		
Найменше значення, V_{-1}	Середнє значення, V_0	Найбільше значення, V_1	Найменше значення, l_{-1}	Середнє значення, l_0	Найбільше значення, l_1	Найменше значення, h_{-1}	Середнє значення, h_0	Найбільше значення, h_1
0,8	0,9	1	0,6	0,7	0,8	0	0,4	0,8

На основі діапазонів варіювання факторів, що викладені в табл. 2, із використанням матриці плану повнофакторного експерименту за табл. 1, виконано необхідні обчислення й отримано значення дисперсії температур по обігрівальній поверхні досліджуваних фрагментів залізобетонних будівельних конструкцій. Результати обчислень систематизовано в табл. 3.

Таблиця 3 – Дисперсія температур по обігрівальній поверхні фрагментів залізобетонних будівельних конструкцій за результатами повного факторного експерименту

Експериментальна ситуація (табл. 3.3)	1	2	3	4	5	6	7	8
S^2	958	1204	1366	1486	144	862	988	1328

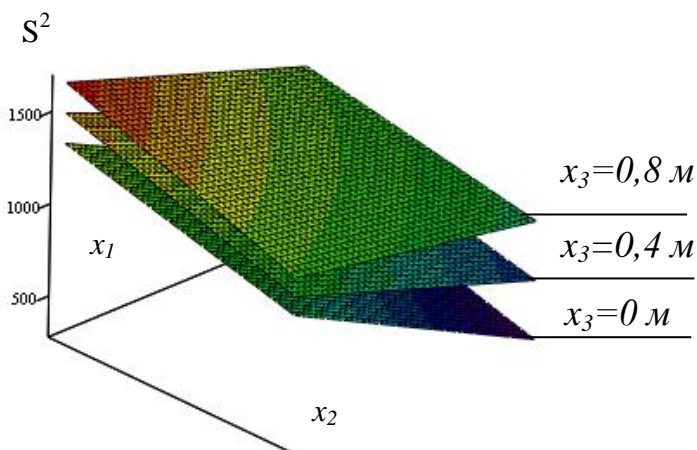


Рисунок 7 – Дисперсія температур у камері вогневої печі за постійного місця розташування отвору для відведення продуктів горіння (фактор 3) та варіації інших факторів

Нижче представлено результати повного факторного експерименту з визначення дисперсії температур по обігрівальній поверхні фрагментів несучих залізобетонних конструкцій.

На основі числових величин табл. 2 та 3 обчислено коефіцієнти регресії (6). Результати обчислень із визначення коефіцієнтів регресії подано нижче в табл. 4.

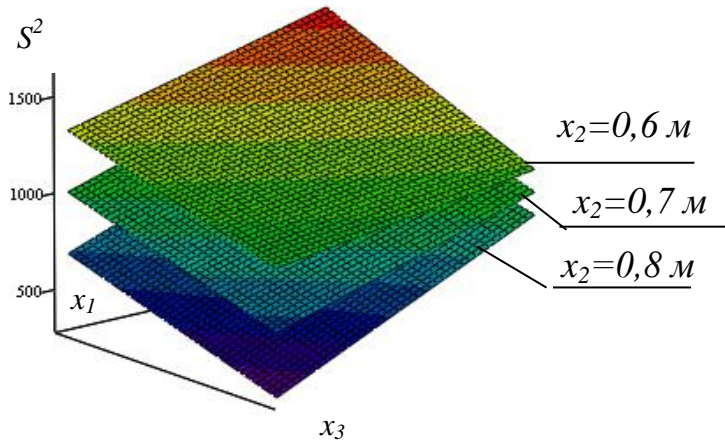


Рисунок 8 – Дисперсія температур у камері вогневої печі за незмінної відстані до пальників (фактор 2) та варіації інших факторів

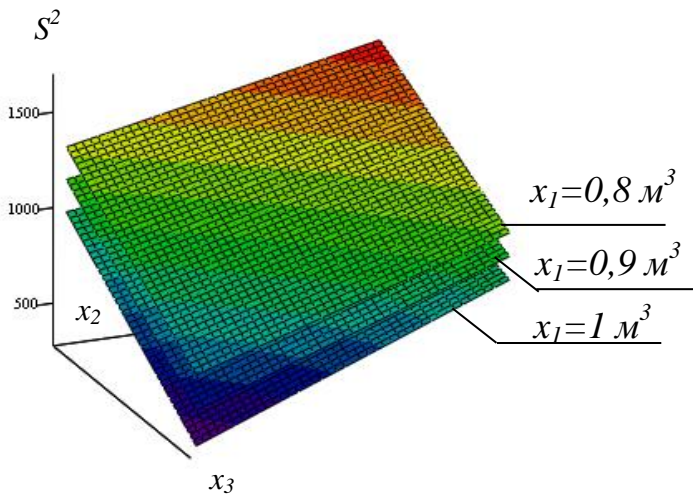


Рисунок 9 – Дисперсія температур у камері вогневої печі за незмінного об'єму камери печі (фактор 1) та варіації інших факторів

залізобетонної будівельної конструкції (l) та висоти, на якій розташований отвір для виходу продуктів горіння (h) у вигляді

$$S^2 = 4221 + 4133 \cdot h - 2555 \cdot l - 1220 \cdot V - 800 \cdot V \cdot l - 5513 \cdot V \cdot h - 5150 \cdot l \cdot h + 7875 \cdot V \cdot l \cdot h \quad (7).$$

Отримання регресійної залежності вможливило створення математичної моделі вогневої печі, що забезпечує відтворюваність результатів експериментів. Необхідно змодельовати піч із наявними всередині фрагментами конструкцій та перевірити розподіл температур по їхніх поверхнях.

В основу математичного апарату програмного комплексу, застосованого для перевірки відтворюваності результатів експериментів під час нагрівання із зазначеними фрагментами конструкцій, потрібно покласти повну систему рівнянь Нав'є – Стокса. Для замикання рівнянь використовують граничні умови 3-го роду. У розділі

Таблиця 4 – Коефіцієнти регресії для обчислення дисперсії температур по обігрівальній поверхні фрагментів залізобетонних будівельних конструкцій

Коефіцієнт	Значення (кодовані)	Значення (реальні)
p_0	1042	4133
p_1	-178	-2555
p_2	-250	-1220
p_3	211,5	-800
p_4	-63	-5513
p_5	86,5	-5150
p_6	77,5	7875
p_7	31,3	4221

Після опрацювання даних виявлено закономірність залежності вогнестійкості від найбільш значущих параметрів: об'єм її камери (V), відстань від пальників до поверхні досліджуваного фрагменту несучої

описано основні елементи системи. У звичайному вигляді система рівнянь Нав'є – Стокса складається з двох рівнянь:

- рівняння руху,
- рівняння нерозривності.

У векторному вигляді для нестисливої рідини їх записують у такий спосіб:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0 \quad (8),$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V) + \nabla[\rho V \otimes V] = -\nabla p + \nabla\left[(\mu + \mu_t)(\nabla V + (\nabla V)^T)\right] + S \quad (9),$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla(\rho V h) = \nabla\left[\left(\frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t}\right)\nabla h\right] + Q_{rad} \quad (10),$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_k) + \nabla(\rho V Y_k) = \nabla\left[\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t}\right)\nabla Y_k\right] + Q_k \quad (11),$$

де t – час; ρ – густина; V – вектор відносної швидкості; p – відносний тиск; μ – молекулярна динамічна в'язкість; μ_t – турбулентна динамічна в'язкість; λ – коефіцієнт теплопровідності суміші; Pr_t – турбулентне число Прандтля; Sc – число Шмідта; Sc_t – турбулентне число Шмідта; Y_k – концентрація k -го компонента реакції горіння.

Статичну ентальпію h суміші визначають за виразом:

$$h = h_0 + \int_{T_0}^T c_p dT + \sum_k Y_k H_k \quad (12),$$

де T – температура; h_0 – початкова ентальпія за температури T_0 ; $c_p = \sum_k Y_k c_{p,k}$ – теплоємність суміші за постійного тиску; H_k – теплота утворення k -го компонента.

Для визначення турбулентної в'язкості застосовують різні варіанти, пов'язані зі способами визначення опосередкованих і флуктуаційних складників величин, що входять до рівняння Нав'є – Стокса. Найбільше поширення має стандартна k - ε модель турбулентності, що представлена у вибраному програмному комплексі «CFD» «FlowVision 2.5».

Для замикання системи рівнянь (8) – (11) використовують рівняння стану ідеального газу. Для суміші газів його записують у вигляді:

$$p = \rho R_0 T \sum_k \frac{Y_k}{M_k} \quad (13),$$

де R_0 – універсальна газова стала; M_k – молярна маса k -го компонента.

Модель горіння визначають за швидкістю світла й витратами палива, окисника і продуктів згорання, тому логічною для використання є модель горіння Магнуссена для заздалегідь незмішаного палива й окисника.

Швидкість змішування та хімічної реакції горіння в моделі Магнуссена визначають за формулою:

$$W_{mix} = 23.6 \left(\frac{\mu \varepsilon}{\rho k^2} \right)^{0.25} \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(Y_{C_xH_yO_z}, \frac{Y_o}{i_{chem}} \right) \quad (16).$$

Рівняння, що описують моделі теплообміну у вогневій печі для випробувань. Для обліку радіаційного теплообміну в газовому середовищі, а також із твердим матеріалом доцільно використовувати дифузійну модель випромінювання газу (P1).

Після комп'ютерного моделювання отримано результати. На рис. 10 – 13 зображено розподіл температур по поверхні елементів залізобетонних будівельних конструкцій у разі нагрівання за стандартним температурним режимом пожежі.

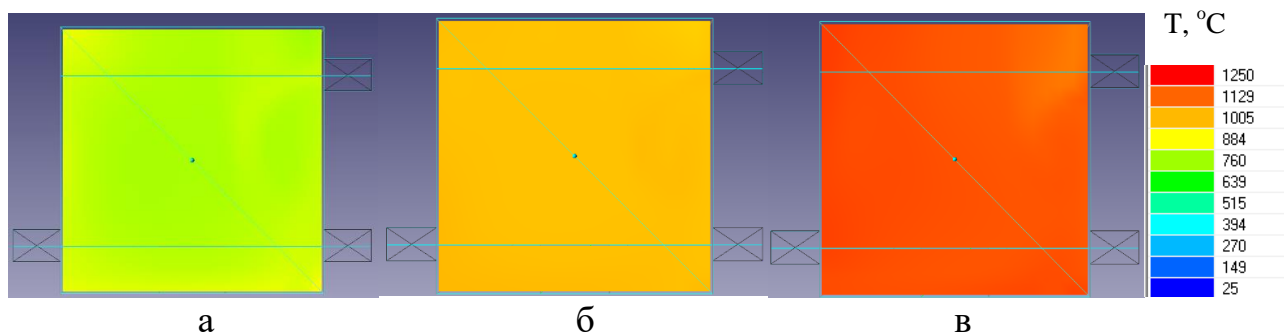


Рисунок 10 – Розподіл температур по обігрівальній поверхні стіни під час нагрівання за стандартним температурним режимом пожежі: а – 10 хвилина, б – 30 хвилина, в – 60 хвилина

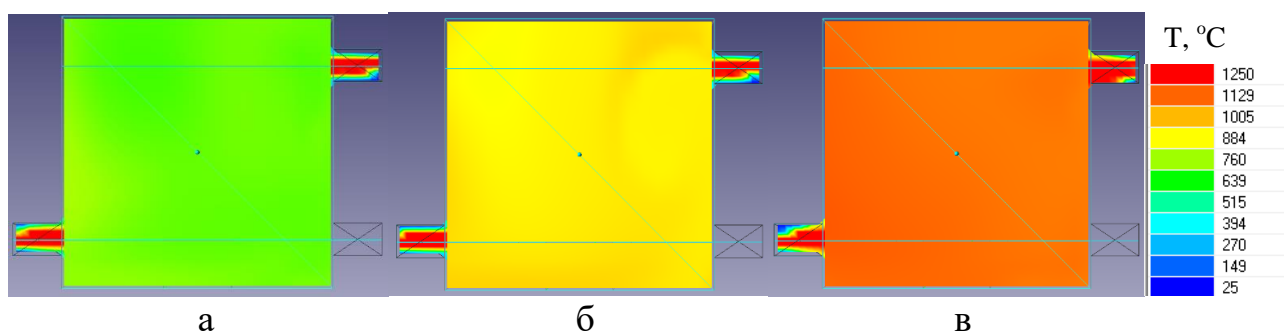


Рисунок 11 – Розподіл температур по обігрівальній поверхні плити під час нагрівання за стандартним температурним режимом пожежі: а – 10 хвилина, б – 30 хвилина, в – 60 хвилина

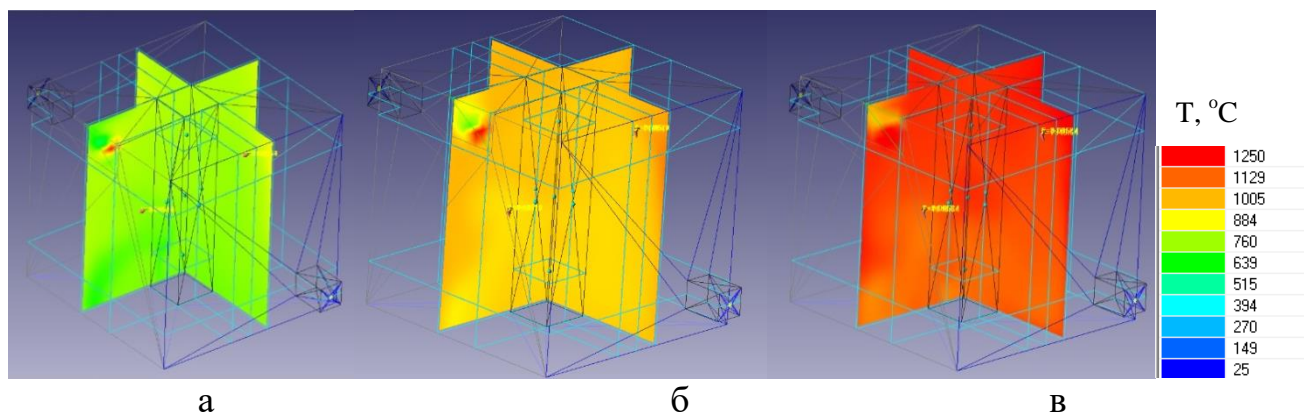


Рисунок 12 – Розподіл температур по обігрівальній поверхні балки під час нагрівання за стандартним температурним режимом пожежі: а – 10 хвилина, б – 30 хвилина, в – 60 хвилина

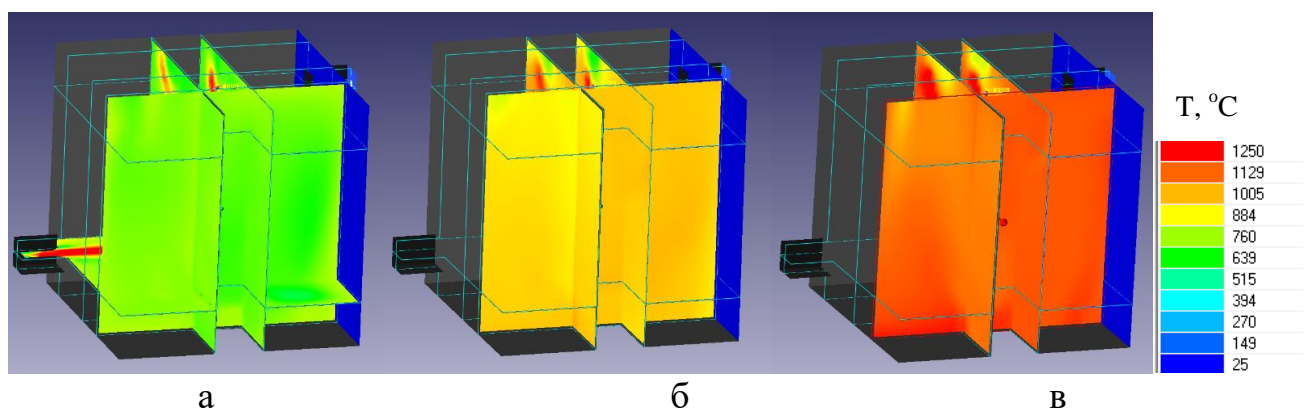


Рисунок 13 – Розподіл температур по обігрівальній поверхні балки під час нагрівання за стандартним температурним режимом пожежі: а – 10 хвилина, б – 30 хвилина, в – 60 хвилина

Аналіз результатів розрахунків, представлених на рис. 10–13, спонукає до висновку про те, що всі три установки забезпечують рівномірність прогріву та відтворення стандартного температурного режиму пожежі.

Для більш якісного аналізу роботи моделей необхідно визначити числові показники. Мета створення моделей – дослідження теплового впливу на будівельні конструкції, тому доцільно забезпечити найбільш можливу рівномірність їхнього прогріву, для якісної відтворюваності даних реальних експериментів.

З'ясовано значення дисперсії температур на поверхні кожної зі змодельованих конструкцій камери печі, на кожній хвилині обчислювального експерименту, після чого побудовано графік зміни її в часі.

Засобами комп'ютерної газогідродинаміки «CFD» «FV 2.5» створено заливки температури на обігрівальній поверхні конструкцій (рис. 10 – 13) та

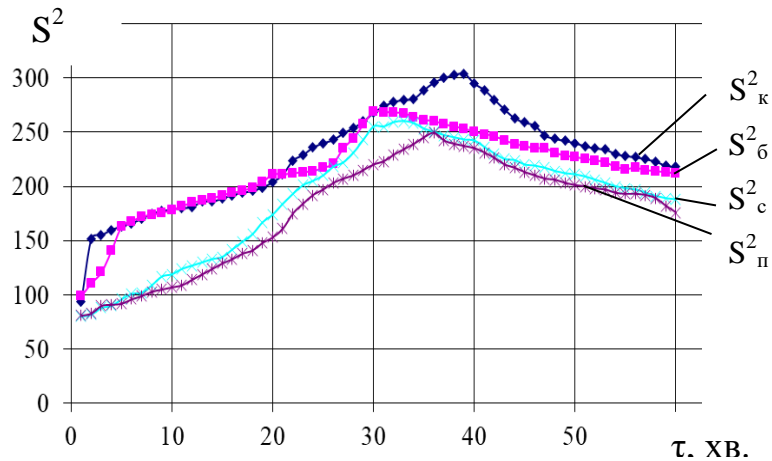


Рисунок 14 – Дисперсія температур по обігрівальній поверхні елементів залізобетонних будівельних конструкцій під час обчислювальних експериментів: S_k^2 – фрагмента колони; S_b^2 – фрагмента балки; S_p^2 – фрагмента плити; S_c^2 – фрагмента стіни

отримано розподіл температур на кожній хвилині випробувань для кожної конфігурації. На підставі опрацьованих відомостей розраховано дисперсію температур (рис. 14).

Відповідно до аналізу отриманих результатів (рис. 14), вибрана конфігурація камери печі повністю задовольняє вимоги до випробувань будівельних конструкцій та здатна забезпечити відтворюваність результатів

Отже, аналіз створеної моделі доводить, що на обігрівальній поверхні всіх видів елементів залізобетонних конструкцій існує несуттєва дисперсія, яка не впливає на якість її прогрівання. Відповідно до комп'ютерного моделювання, є підстави констатувати достатню точність роботи вибраної конфігурації камери печі. Такий підхід уможливив перехід від розрахунків до розроблення ескізів реальної установки з параметрами камери печей, що визначені та перевірені в третьому розділі роботи.

Результати, отримані під час досліджень, описано в розділі 3 та опубліковано в наукових працях [1; 4–5; 9–13; 39; 44; 48; 52; 59].

У четвертому розділі «Розроблення конструкції малогабаритної установки для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції» підготовлено ескіз та описано процес створення реальної установки для реалізації експериментальної частини загальної системи оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій під впливом стандартного температурного режиму пожежі, що здатна забезпечити високий ступінь відтворюваності експериментальних даних, а також обґрунтовано методики проведення експериментів із нагрівання кожного виду малогабаритних фрагментів залізобетонних будівельних конструкцій за стандартним температурним режимом пожежі без механічного навантаження. З'ясовано необхідні мінімальні розміри зразків та способи установки їх у камеру печі.

Прототип вогневої установки створено впродовж кількох етапів. На першому етапі проаналізовано літературні джерела й чинні в Україні та за кордоном нормативні документи. Необхідно максимально зважати на вимоги до конструктивних особливостей. Метод, що підлягає розробленню, є експериментально-розрахунковим, тому конструктивні елементи та камера печі будуть відрізнятися від наявних.

На рис. 15 зображено схему будови малогабаритної установки для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції.

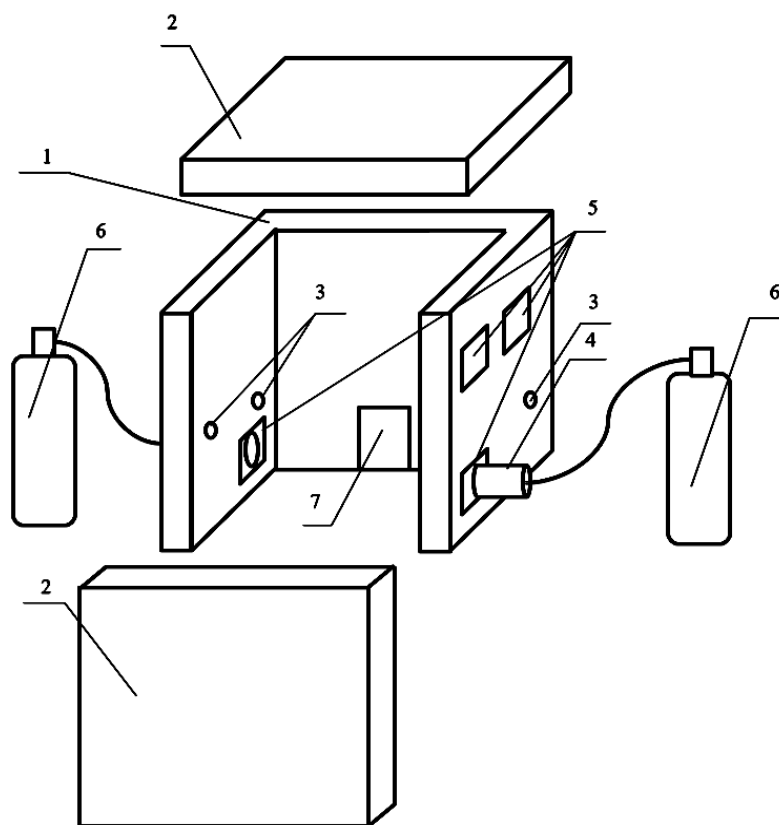


Рисунок 15 – Малогабаритна установка для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції: 1 – п-подібне огороження печі; 2 – знімні панелі; 3 – отвори для встановлення датчиків контролю температури; 4 – пальники; 5 – отвори для встановлення пальників; 6 – газовий балон із регулювальним апаратом; 7 – отвір для відведення продуктів горіння

Малогабаритні установки для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції використовують так: до п-подібного огороження печі 1 встановлюють фрагмент залізобетонної конструкції; залежно від виду конструкції застосовують одну або дві знімні панелі 2. В отвори для датчиків контролю температури 3 та в досліджуваному зразку (на схемі відсутній) встановлюють датчики температури (на схемі відсутні). Далі запалюють пальники 4, які розміщують в отворах для пальників 5. За допомогою подання газу з газового балона 6 усередині камери печі створюють заданий температурний режим.

У нижній частині камери печі розміщено отвір для відведення продуктів горіння 7, існує технічна можливість зміни розмірів отвору для відведення продуктів горіння, що допомагає додатково регулювати процес прогрівання камери печі й температурний режим пожежі. Температуру досліджуваного зразку контролюють за допомогою спеціальних технічних засобів (на схемі відсутні). Результати вогневих експериментів опрацьовують відповідно до чинних стандартів і розроблених методик.

Створення прототипу установки було заплановано, а у подальшому втілено, на навчальному комплексі практичної підготовки фахівців Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту ЧСПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України (с. Свидівок, Черкаського району, Черкаської області).

На рис. 16 зображено загальний вигляд розміщення запроєктованого прототипу випробувальної установки на території комплексу.

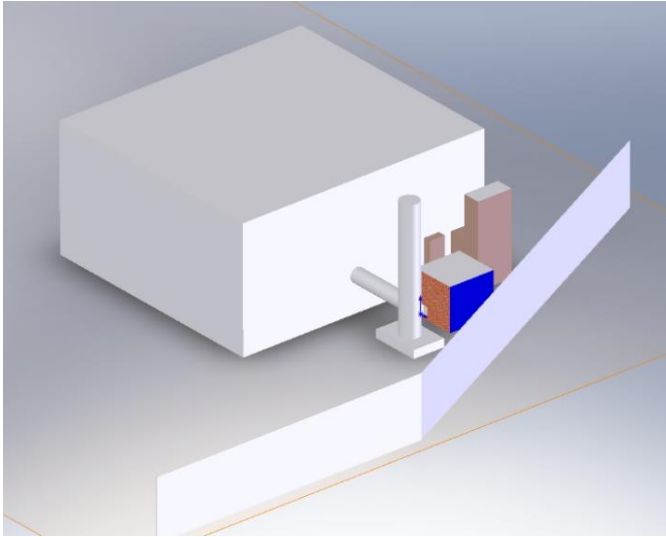


Рисунок 16 – Загальний вигляд розміщення запроєктованого прототипу випробувальної установки на навчальному комплексі практичної підготовки Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України

До початку випробування зафіксовано дату проведення дослідження, температуру навколишнього повітря, вологість повітря, силу й напрям вітру. Верхню та передню частини установки закривають кришкою. Для щільності прилягання застосовано мінеральну вату.

Під час створення температурного режиму використано 2 пальники, розміщені в нижній частині камери печі так, щоб факели полум'я були розташовані не менше, ніж на 80 см до верхньої кришки. На час тестових запусків місця для пальників, що не використовували, були закладені цеглою та мінеральною

ватую. Це сприяло запобіганню виходу пічних газів через отвори (рис. 17).



Рисунок 17 – Фото камери печі та установки ззовні до початку експериментів

До початку випробувань встановлено 3 термометри типу ТХА для контролю температурного режиму та перевірки можливості його відповідності «стандартному».

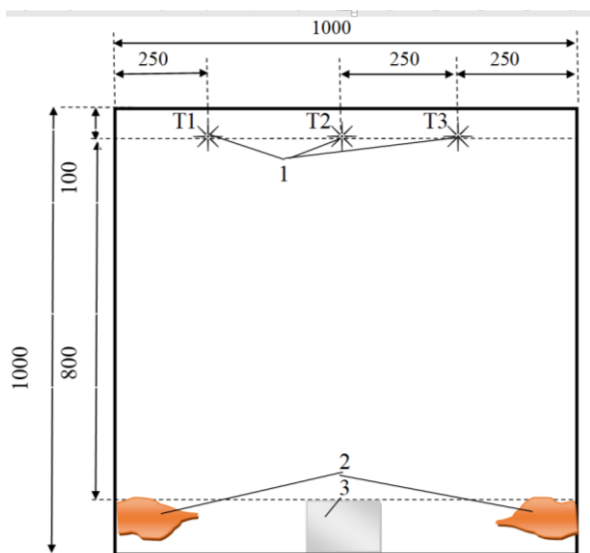


Рисунок 18 – Схема розташування засобів виміральної техніки під час тестових запусків установки: 1 – термопары ТХА; 2 – факели полум'я; 3 – отвір для виходу продуктів горіння

застосовано світлоповертальний теплоізоляційний матеріал;

- систему подання газу та місця розміщення термопар не змінено;
- для фіксації цифрових значень температури в місцях установки термопар необхідно спеціально розробити й виготовити модуль аналого-цифрового перетворення (АЦП) сигналу щонайменше на 18 термопар.

У процесі тестового запуску № 3 майже не виявлено виділення димових газів з-під кришок печі протягом усього експерименту. Крім того, температурний режим у камері печі був стандартним.

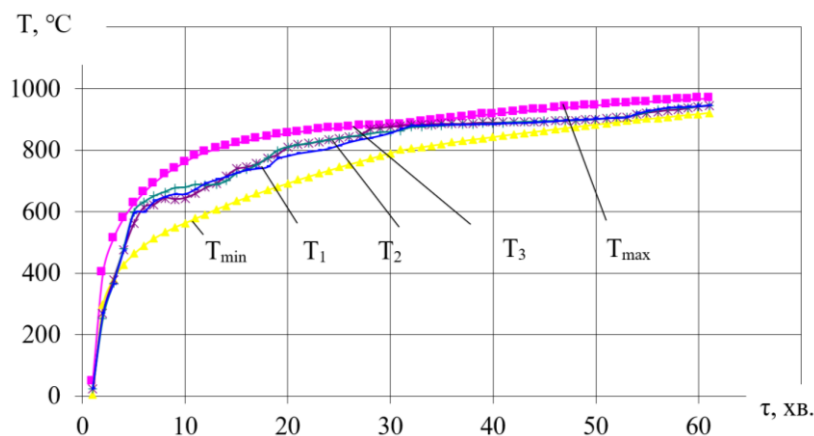


Рисунок 19 – Лінійна швидкість нагрівання камери печі в ході тестового запуску № 3: $T_1 - T_3$ – покази термопар у камері печі, T_{\min} , T_{\max} – верхня та нижня температурні межі в разі нагрівання за стандартним температурним режимом пожежі

На рис. 18 зображено, що засоби виміральної техніки (термопары $T_1 - T_3$), встановлені до початку тестових запусків, розміщено на 100 мм нижче від обігрівальної поверхні. Відстань до факелу полум'я становить не менше як 800 мм.

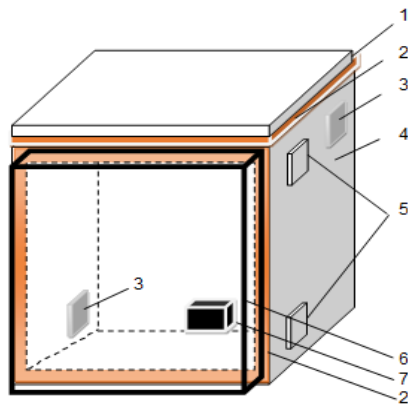
Під час тестового запуску проведено фотофіксацію експерименту. Узято до уваги недоліки тестових запусків №№ 1 та 2:

- замінено магнетитові листи на листи з неіржавної сталі;
- для кращої герметизації камери печі в місцях прилягання кришок до стінок камери, окрім мінераловати й вапняного шнура,

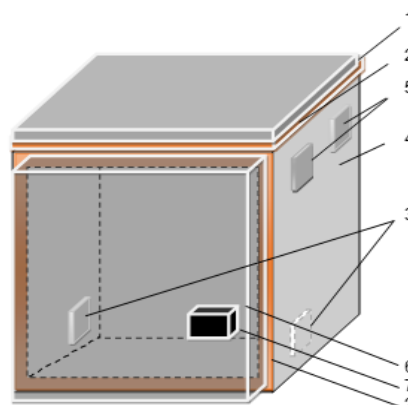
На рис. 19 відображено результати прогріву камери печі під час тестового запуску № 3. Згідно з даними прогріву камери печі (рис. 20), температура в камері перебувала в межах «стандартних» випробувань та плавно продовжувала зростати впродовж експерименту. На 61-й хвилині ще була можливість збільшити інтенсивність подання палива й підвищити температуру.

Зроблено висновок про можливість забезпечення температурного режиму в камері вогневої печі, відповідно до необхідних умов випробувань. Продовження експерименту стало недоцільним, тому його зупинено на 61-й хвилині.

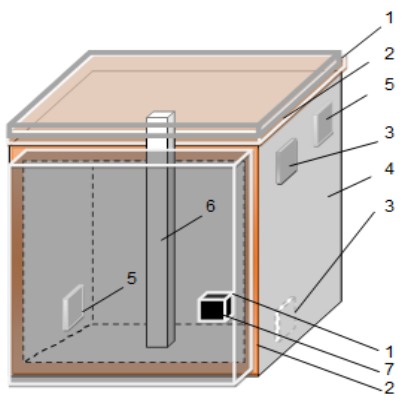
Дані, отримані за результатами тестових запусків, підтверджують можливість створення стандартного температурного режиму пожежі всередині камери та відтворення результатів експериментів. У межах розділу необхідно було розробити методику випробувань для кожного елемента будівельних конструкцій, з огляду на конструктивні особливості установки.



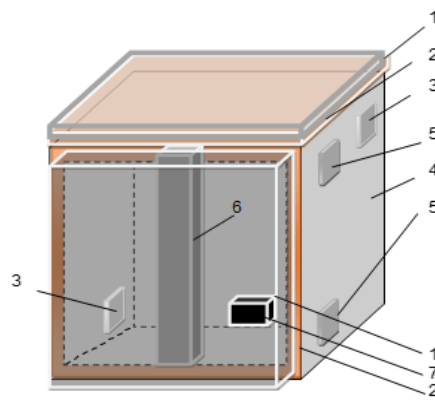
фрагмент стіни



фрагмент плити



фрагмент колони



фрагмент балки

Рисунок 20 – Схеми установки фрагментів елементів залізобетонних конструкцій у малогабаритну установку: 1 – знімна панель; 2 – ущільнювач із мінеральної вати та вапняного шнура; 3 – пальники, що створюють температурний режим у камері печі; 4 – огороження печі; 5 – місця для пальників, що не використовують під час вогневих випробувань стін; 6 – фрагмент елемента залізобетонної конструкції; 7 – отвір виходу продуктів горіння

Для випробування стінових елементів і фрагментів плит необхідно зважати на те, що елементи зазнають одностороннього обігріву, їх встановлюють із зовнішнього боку печі. У цих випадках габаритні розміри фрагментів повинні бути ширшими за розміри камери, щонайменше на 100 мм із кожного боку. Виконання балок і колон мають передбачати можливість встановлення мінераловатного ущільнювача в частинах, що прилягають до

кришок. Схеми установки конструкцій подано на рисунку 20.

Модуль, побудований на базі мікросхеми max. 31855, створено так, що він може перетворювати аналоговий цифровий сигнал від 18 термопар на цифровий із максимальним значенням температури до 1350 °С.

У розділі 2 зазначено, що термопары повинні бути розміщені так, щоб була необхідна мінімальна кількість для забезпечення розрахункової частини розроблюваних методик.

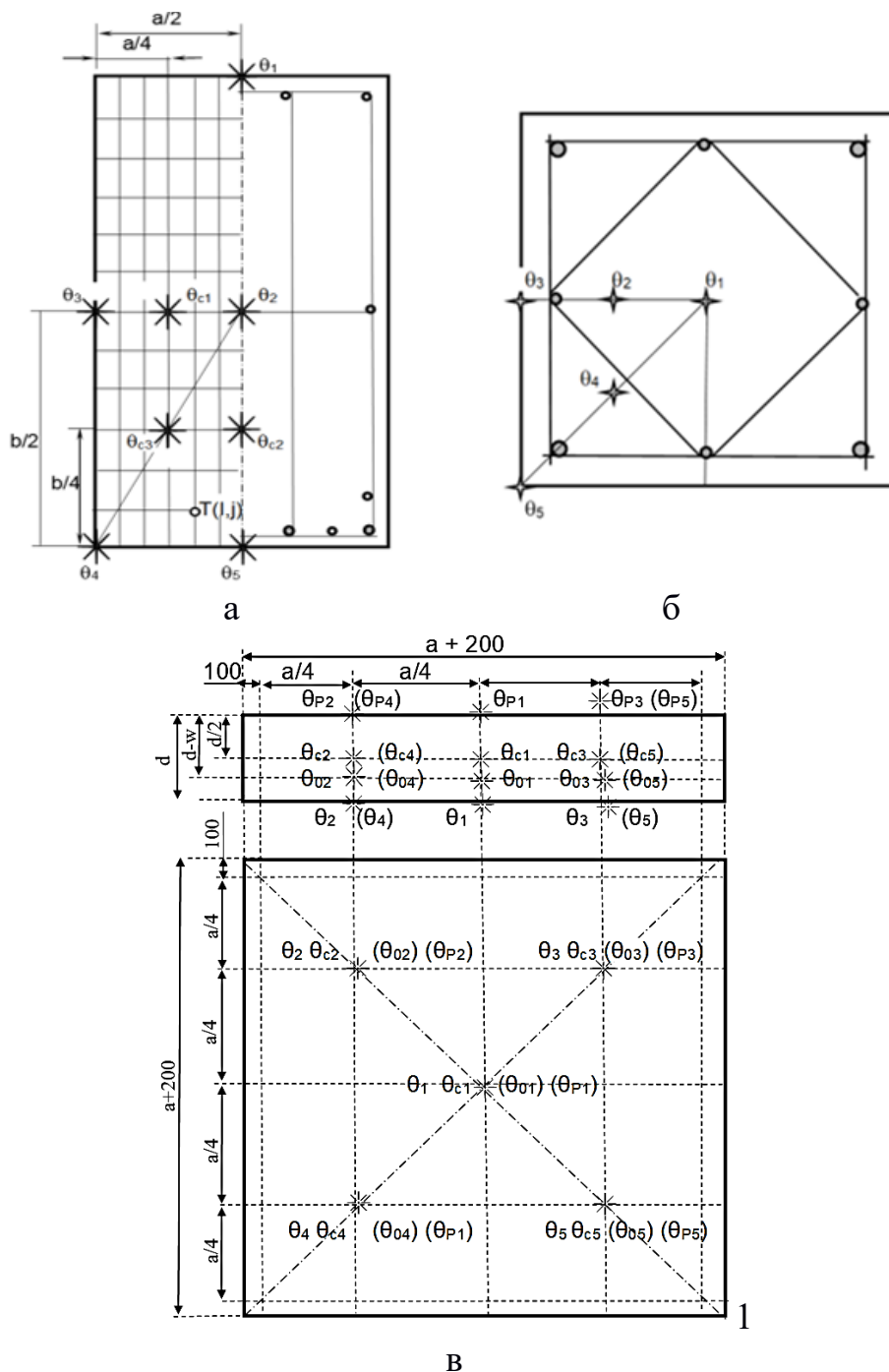


Рисунок 21 – Схеми розташування термопар та розбиття фрагментів елементів несучих залізобетонних конструкцій на перерізи: а – балки, б – колони, в – плити та стіни.

На підставі визначених під час дослідження інтерполяції температур усередині конструкцій уперше обґрунтовано місця встановлення засобів виміральної техніки для точкових замірів температури в реальних конструкціях. У ході випробування стін і плит використовують більшу кількість засобів для врахування не тільки несучої здатності, а й інших двох критеріїв вогнестійкості та якісного проведення інтерполяції за запропонованими схемами. Схеми представлено на рис. 21.

Основна вимога до виготовлення фрагментів конструкцій: матеріали, які входять до складу залізобетону, мають бути саме тими, із

яких у майбутньому виготовлятимуть конструкцію.

Проведення експериментів вимагає протоколювання даних, що стосуються досліджень. Перед початком експериментів у протоколі фіксують:

- дату проведення випробувань;
- температуру повітря;
- вологість повітря;
- напрям і силу вітру.

Особливість встановлення балок і плит полягає в тому, що для випробування їх можна розташовувати вертикально. Це вмотивоване тим, що конструкції перебувають тільки під власною вагою (без додаткового механічного навантаження), тому температура прогріву залежить від теплового потоку, що виникає всередині печі, а на його поширення не впливає положення конструкції, лише позначається відстань до пальників та нахилу, що є ідентичними.

У протоколі записують габаритні розміри зразків для випробувань. Рекомендовано виготовлення трьох однакових зразків в ідентичних умовах для подальших випробувань і перевірки адекватності отриманих результатів.

На час проведення експериментів із нагрівання фрагментів елементів конструкцій закривають місця для пальників, що не використовують, цеглою і мінеральною ватою, що дає змогу запобігти виходу пічних газів через отвори.

У процесі випробувань доцільно вести фотофіксацію та відеофіксацію експерименту. Температурний режим нагрівання камери печі має відповідати стандартному температурному режиму пожежі

Отже, за результатами досліджень обґрунтовано місця встановлення засобів виміральної техніки для точкових замірів температури, що, на відміну від випробувань вогнестійкості в наявних установках, розміщуються не лише на необігрівальній поверхні зразків, а й усередині фрагментів несучих залізобетонних будівельних конструкцій для отримання даних, необхідних і достатніх для інтерполяції температурних полів у конструкціях. Для оцінювання їхньої вогнестійкості на основі отриманих розподілів створено та перевірено роботу реальної малогабаритної вогневої установки, запропоновано методики експериментальних досліджень.

Результати, отримані під час досліджень й описані в розділі 3, опубліковано в наукових працях [3–4; 7; 27–28; 42; 47; 50].

У п'ятому розділі **«Результати експериментальних досліджень теплового впливу пожежі на фрагменти елементів залізобетонних будівельних конструкцій»** за розробленими методиками проведено 12 вогневих експериментальних досліджень впливу стандартного температурного режиму пожежі на малогабаритні фрагменти несучих залізобетонних будівельних конструкцій (3 для кожного з видів конструкцій) без механічного навантаження.

Під час експериментів зафіксовано характерні для залізобетону процеси виділення вологи та пари. Отримано дані щодо прогрівання всіх необхідних елементів для проведення розрахункової частини. У процесі роботи вперше обґрунтовано раціональний спосіб встановлення та комбінації засобів виміральної техніки всередині камери печі. У ході випробувань вогнестійкості взято до уваги місця, описані в стандартах, залежно від аналізованих видів печі чи

будівельної конструкції. В універсальній печі місця визначені так, щоб вид досліджуваної конструкції та розміщення пальників у ході експериментів не впливали на похибку в разі контролю температурного режиму пожежі. Крім того, не потрібно застосовувати велику кількість засобів, оскільки доведено, що їхню кількість можливо зменшити на 40 %.

На рис. 22 представлено фото заздалегідь підготовлених фрагментів елементів несучих залізобетонних конструкцій.



Рисунок 22 – Вигляд зразків фрагментів елементів несучих залізобетонних конструкцій під час підготовки до експериментальних досліджень впливу стандартного температурного режиму пожежі

До випробування виготовлено по 3 фрагменти залізобетонних конструкцій номінальним розміром 1200×1200 мм для стін і плит, довжиною 1 м для балок та колон. Дозування складників сумішей і їхнє ущільнення виконано за допомогою спеціальних засобів. Конструкцію виготовлено за допомогою стандартної розбірної опалубки. Зразки перебували в опалубці впродовж семи діб. Після розпалубки фрагмент і допоміжні зразки зберігалися протягом 28 діб. Після витримки фрагменти перебували в нормальних умовах температури й вологості до початку випробувань.

До початку випробувань встановлено термометри й інші метрологічні засоби: у камері вогневої печі – 3 термометри типу ТХА для контролю температурного режиму та забезпечення його відповідності стандартному; усередині та на конструкціях відповідно до схеми розташування, розбиття фрагментів елементів несучих залізобетонних конструкцій на перерізи, що зображено на рис. 21.

Засоби виміральної техніки, встановлені до початку випробувань, пронумеровано. Додатково застосовано такі засоби: ноутбук, модуль АЦП,

лінійка вимірювальна, секундомір СОС пр-2б-2-000, психрометр аспіраційний МВ-4М, штангенциркуль ЩЦ-1, барометр-анероїд М67, анемометр АСО-3, ваги MW-1200. Всі засоби проходили своєчасну повірку та відповідали діючим нормативним документам у сфері метрології.

Згідно з даними прогріву термопар, лінійна швидкість нагрівання камери печі відповідала «стандартній» температурній кривій пожежі в усіх 12 дослідках, перебуваючи в стандартних межах. За досягнення значення 980 С встановлено стаціонарний режим за допомогою регулювання потужності нагріву печі. Усі випробування обмежені шістьдесятьма трьома хвилинами, оскільки далі температурний режим наближається до стаціонарного.

Унаслідок нагрівання залізобетону, починається його деструкція з виділенням води та пари всередині. Цей факт зафіксовано під час нагрівання плит і стін, оскільки конструкції прилягають до камери, а не розташовані всередині неї.

Після закінчення нагрівання візуально констатовано, що втрати цілісності, теплоізолювальної та несучої здатності зразків в усіх 12 випадках не відбулося. На рис. 23 – 26 представлено результати нагрівання всіх видів досліджуваних несучих будівельних конструкцій.

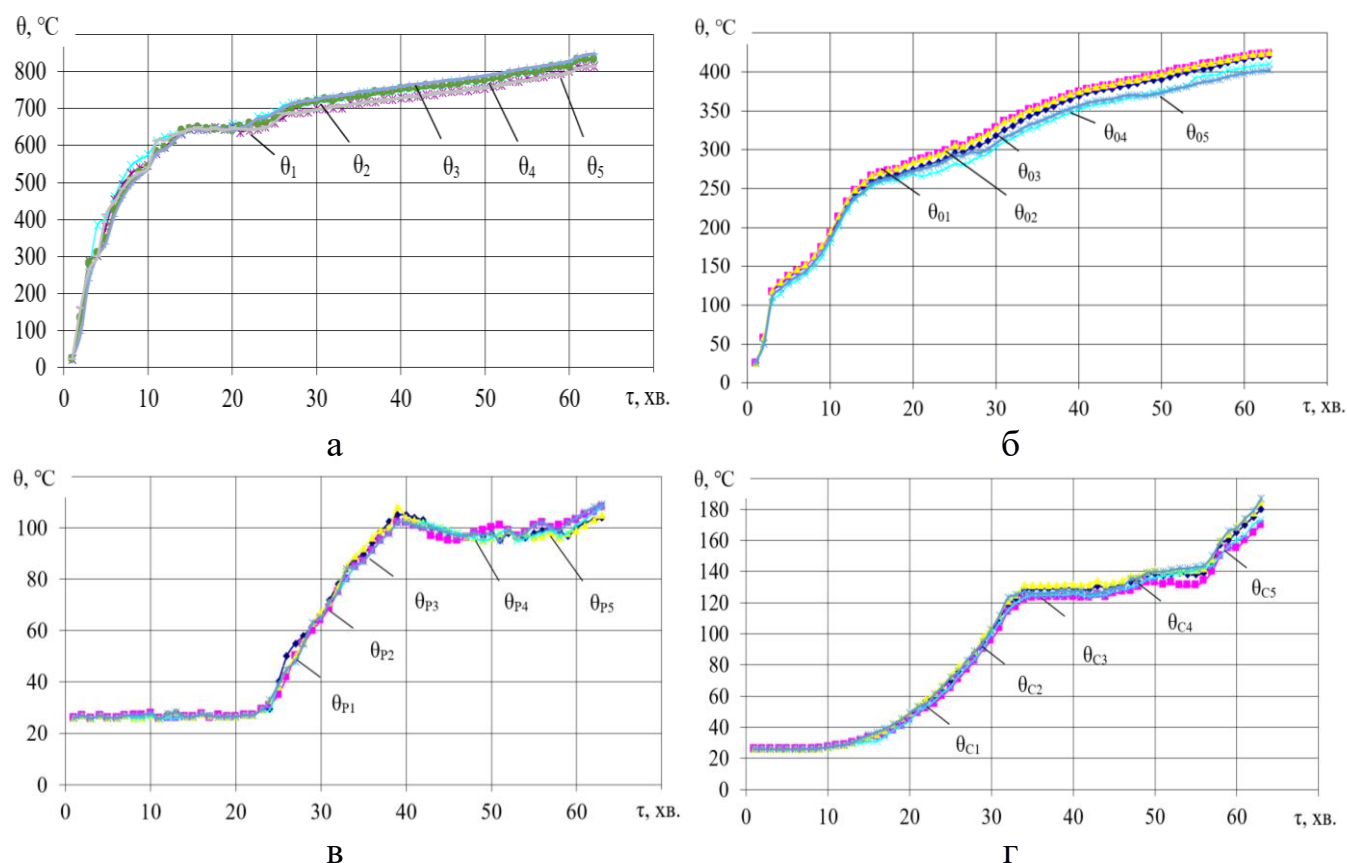
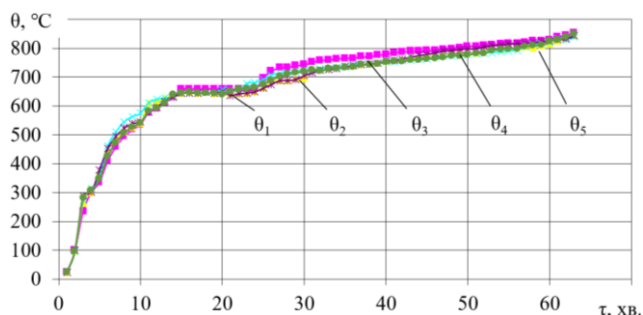
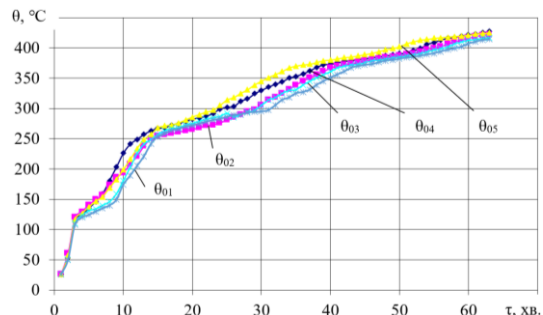


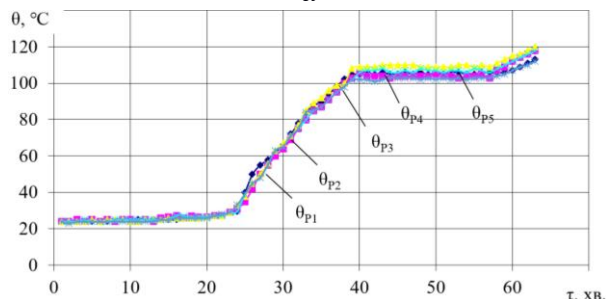
Рисунок 23 – Результати вимірювання температури під час дослідження прогрівання залізобетонних стін: а – на обігрівальній поверхні; б – на рівні арматури; в – на необігрівальній поверхні; г – у середній частині стіни; θ_i – показники термопар (рис. 21)



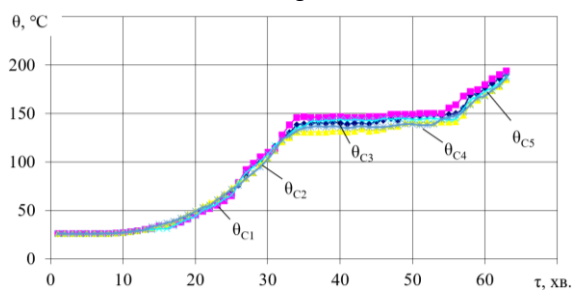
а



б

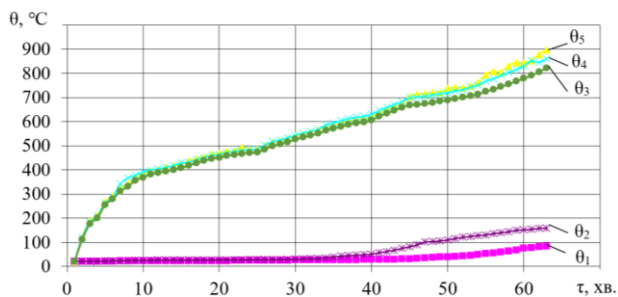


в

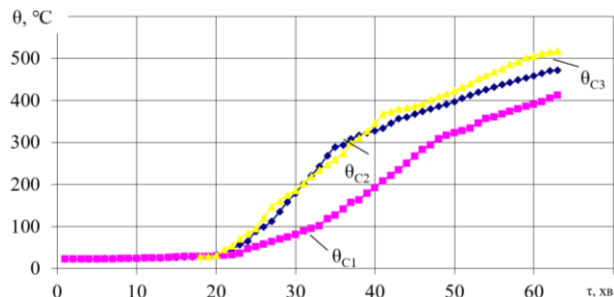


г

Рисунок 24 – Результати вимірювання температури під час дослідження прогрівання залізобетонних плит: а – на обігрівальній поверхні; б – на рівні арматури; в – на необігрівальній поверхні; г – у середній частині плити; θ_i – показники термопар (рис. 21)



а



б

Рисунок 25 – Результати вимірювання температури під час дослідження прогрівання залізобетонних плит: а – на поверхні та всередині; б – на лініях перетину; θ_i – показники термопар (рис. 21)

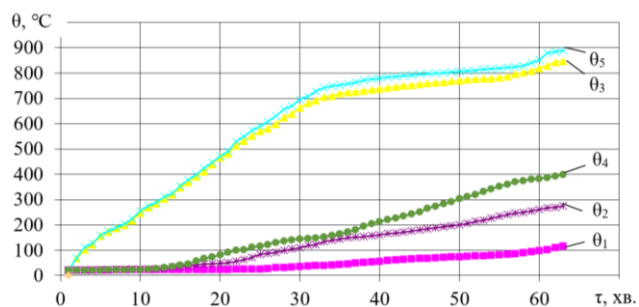


Рисунок 26 – Результати вимірювання температури під час дослідження прогрівання залізобетонних колон: θ_i – показники термопар (рис. 21)

Адекватність експериментальних даних перевірено щодо кожного виду будівельних конструкцій. Отримано й зіставлено дані в межах випробування трьох ідентичних конструкцій кожного виду.

Для з'ясування того, наскільки експерименти здатні до відтворення результатів, необхідно отримати

кількісні показники щодо адекватності проведених випробувань. Перевірка адекватності виконана на підставі експериментальної інформації, одержаної внаслідок вогневих випробувань фрагментів будівельної конструкції.

Проведено 3 експерименти за стандартним температурним режимом пожежі в прототипі вогневої печі для 4 видів залізобетонних конструкцій: стіни, плити перекриття, колони й балки.

За результатами розрахунку методів математичної статистики підтверджено гіпотезу про відтворюваність і достовірність отриманих експериментальних даних через обчислення критеріїв адекватності та визначення відносної похибки між отриманими результатами. Збіжність отриманих даних становить: для плити – 4,0 %; для стіни – 3,6 %; для колони – 4,0 %; для балки – 7,9 %.

Результати, отримані під час досліджень та описані в розділі 5, опубліковано в наукових працях [2; 6; 32; 34; 40–41; 43; 45; 51; 61–64; 67].

У шостому розділі «Обґрунтування комплексу методик оцінювання межі вогнестійкості будівельних конструкцій на основі експериментальних даних» представлено комплекс методик обчислення несучої здатності елементів залізобетонних будівельних конструкцій за результатами відновлення температурних полів у їхніх перерізах, що дає змогу оцінити межу вогнестійкості несучих будівельних конструкцій точніше за наявні методи (на 9,5 % для стін; на 3 % для плит; на 9,5 % для балок і на 8,3 % для колон).

Отримання даних у встановлених контрольних точках уможливило перехід до реалізації завдання з відтворення температурних розподілень у перерізах несучих залізобетонних будівельних конструкціях, відповідно до експериментальних результатів. У подальших розрахунках можна брати до уваги не тільки температурні показники впливу, а й одночасну дію механічних навантажень.

На рис. 27 – 30 представлено результати інтерполяції температур за значеннями температур у контрольних точках перерізу в ключові моменти часу.

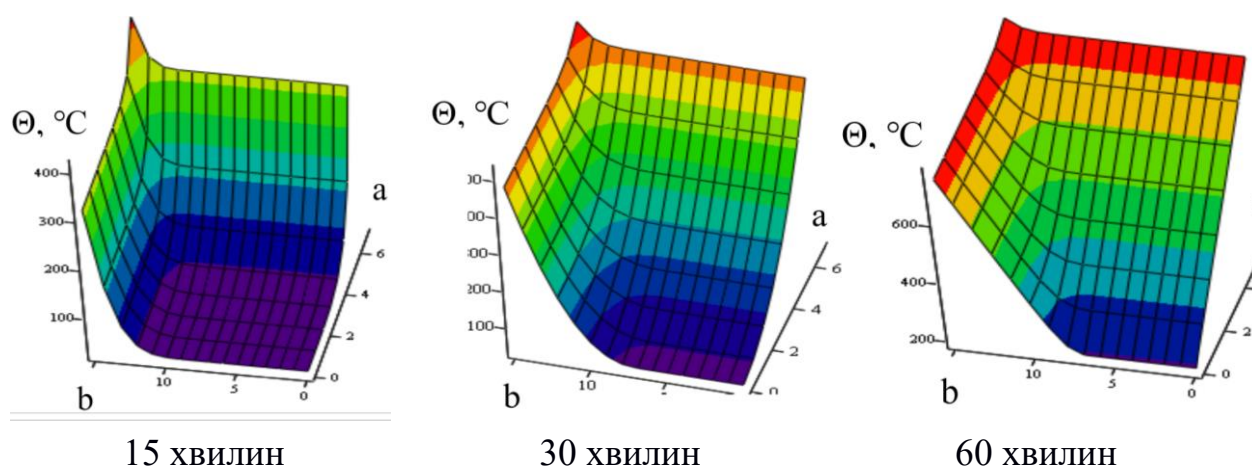


Рисунок 27 – Результати інтерполяції температур усередині балки за значеннями в контрольних точках перерізу

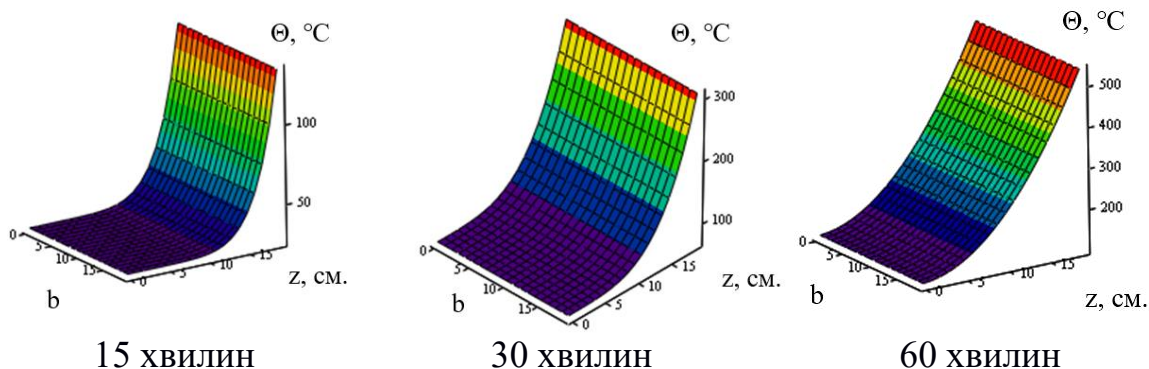


Рисунок 28 – Результати інтерполяції температур усередині плити за значеннями в контрольних точках перерізу

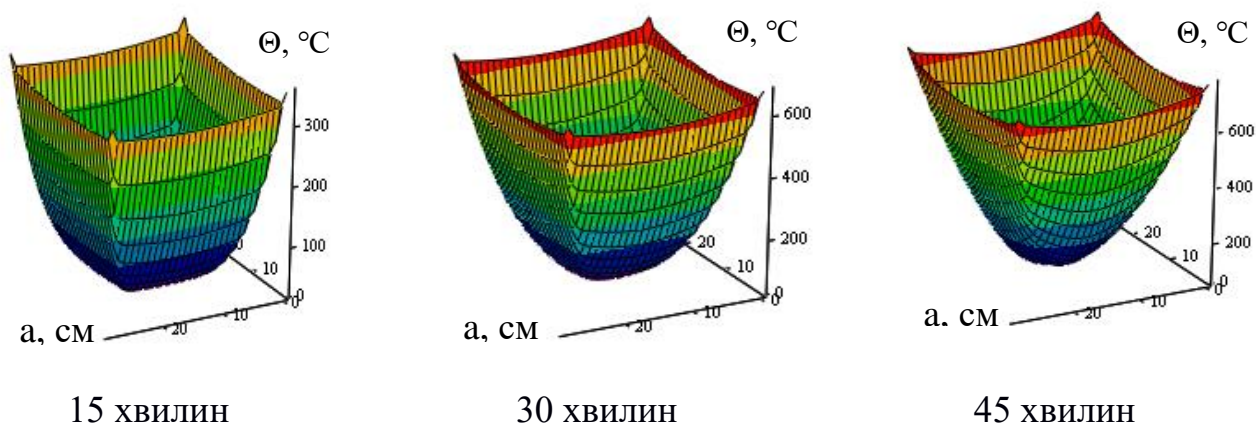


Рисунок 29 – Результати інтерполяції температур усередині колони за значеннями в контрольних точках перерізу

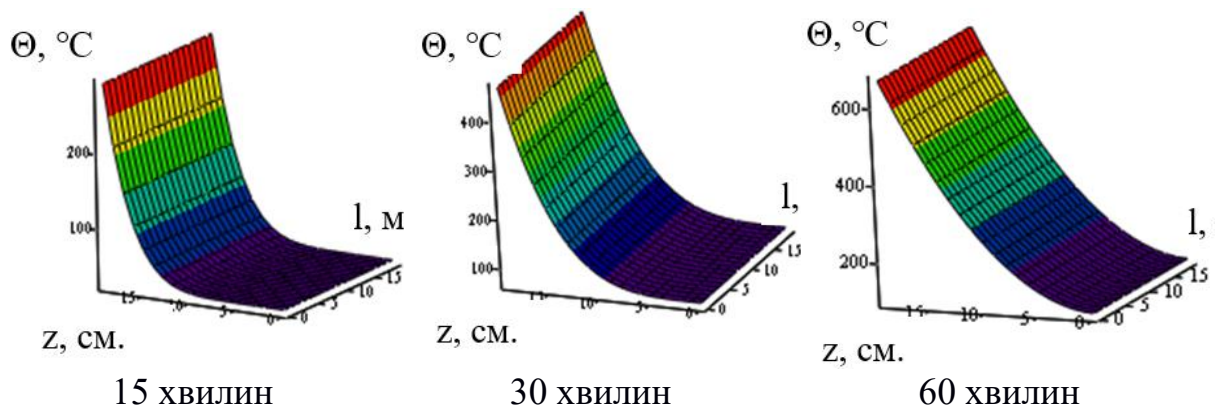


Рисунок 30 – Результати інтерполяції температур усередині стіни за значеннями в контрольних точках перерізу

Метод базований на аналізі змін механічних властивостей кожного шару бетону й арматурної сталі, залежно від температури нагріву. Принцип зміни механічних властивостей бетону та арматурної сталі зображено на рис. 31. Таку зміну беруть до уваги в процесі опису параметрів напружено-деформованого стану в перерізі балки, відповідно до шарнірної схеми її закріплення,

геометричних параметрів, класу міцності бетону та арматурної сталі. Рівняння, що описують напружено-деформований стан, вибрані згідно з рекомендаціями EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2.

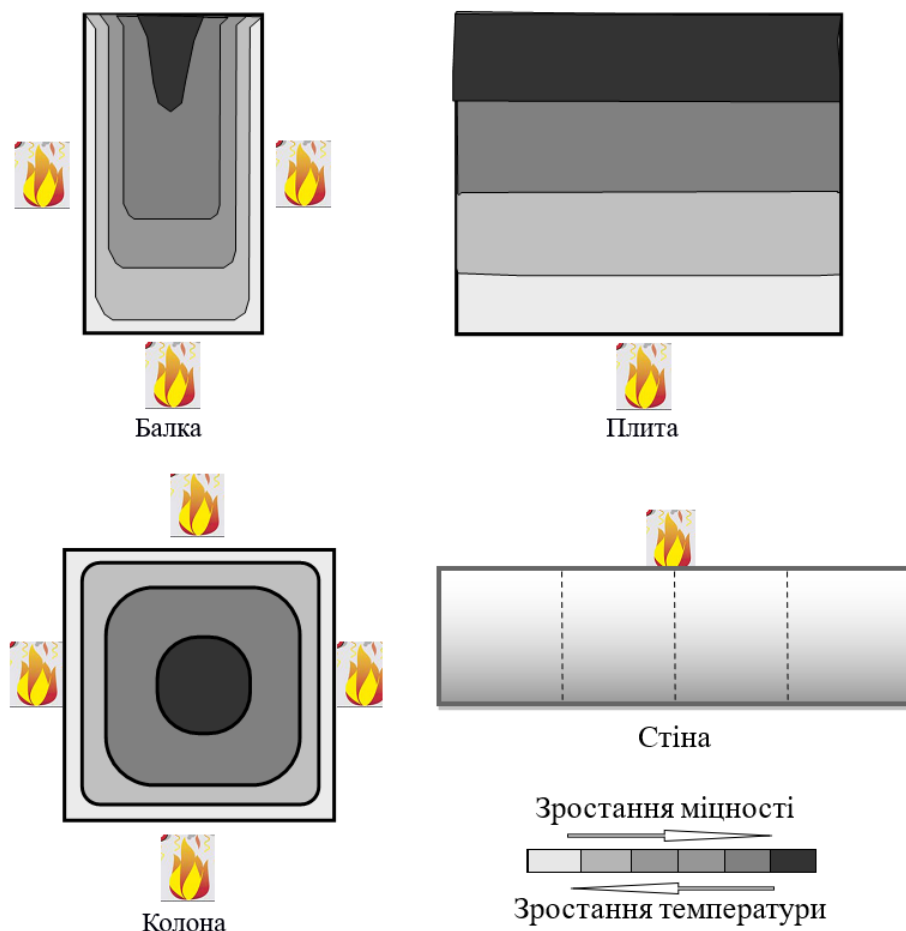


Рисунок 31 – Принцип зміни механічних властивостей бетону й арматурної сталі для різних типів елементів несучих залізобетонних будівельних конструкцій

Суть запропонованих методів полягає в тому, що на основі експериментальних даних до уваги беруть не тільки спільне температурно-силове навантаження, а й реальні габарити несучих залізобетонних конструкцій. Цей момент відсутній у сучасних підходах до оцінювання вогнестійкості. У ході дослідження створено розрахунковий алгоритм.

Завантаження параметрів елемента

передбачає введення основних параметрів і габаритів конструкцій, аналіз умов роботи та даних експериментальних досліджень для вивчення спільного температурно-силового впливу на конструкцію.

Розроблено сторінки для фіксації вхідних даних щодо кожного виду несучих конструкцій. Також обґрунтовано систему розрахункових процедур. На рис. 32 як приклад представлено лістинг сторінки введення початкових даних для балки. Аналогічні сторінки створено й для інших типів конструкцій.

Для розв'язування задачі міцності використовують зонний метод, що полягає в розділенні перерізу неушкодженої зони, не здатної опиратися силовій дії механічного навантаження та зони, яка чинить опір механічним навантаженням на рівні ненагрітого бетону.

								9		11			14			15		17		19
Діагональ		Вертикаль				Горизонталь		Свойства бетона		Свойства арматури			Геометрические размеры			Распределенная нагрузка, q, т/м				
То3, °C	Т4, °C	Т5, °C	То2, °C	Т2, °C	Т1, °C	Т3, °C	То1, °C	Класс прочности	Тип	Класс прочности	Диаметр d, м	Диаметр d1, м	Диаметр d2, м	Ширина a, м	Высота b, м	Длина L, м	Толщина защитного слоя w, м			
22	22	22	22	22	22	22	22	C 20/25		1	A400C	0,016	0,016	0,016	0,2	0,3	4,75	0,025	1,5	
22	185	189	22	22	22	22	177													
22	209	212	22	22	22	22	201													
22	264	267	22	23	22	22	256													
22	287	292	23	23	22	22	279													
22	341	324	23	24	23	23	312													
23	367	344	23	24	23	23	331													
23	379	369	24	25	23	23	357													
23	392	382	24	25	23	23	369													
25	399	395	25	26	23	23	382													
25	405	401	25	27	23	23	389													
25	411	410	25	27	23	23	395													
26	418	416	26	27	23	23	401													
27	429	422	26	27	24	24	408													
28	432	436	27	27	24	24	419													
29	442	447	27	27	24	24	429													
29	451	453	28	27	24	24	438													
29	460	463	30	28	24	24	447													
31	464	469	32	28	24	24	451													
45	471	477	35	28	24	24	458													
54	477	478	45	28	25	25	464													
71	481	493	56	28	25	25	468													
84	484	484	65	29	25	25	471													
95	486	486	88	29	26	26	473													
121	503	499	99	29	26	26	486													
147	517	513	112	29	26	26	500													
160	524	520	135	30	26	26	507													
175	533	529	158	30	26	26	516													

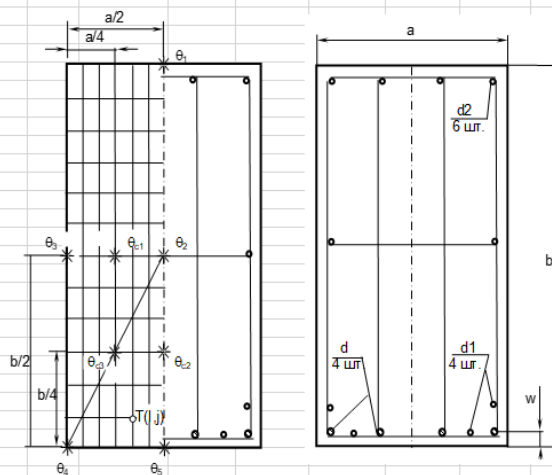


Рисунок 32 – Загальний вигляд сторінки введення даних

Цей метод заснований на виконанні низки процедур.

1. Половину товщини перерізу поділити на n паралельних зон однакової товщини, де $n \geq 3$.
2. Для кожної із зон визначити середню температуру.
3. Визначити коефіцієнт зниження опору на стиск $k_c(\theta_i)$ для кожної із зон за діаграмою зниження міцності бетону, залежно від температури.
4. Визначити середній коефіцієнт зниження для перерізу елемента, зокрема коефіцієнт $(1-0,2/n)$, що зважає в ході розрахунку на зміну температури кожної зони:

$$k_{c,m} = \frac{(1-0,2/n)}{n} \sum_{i=1}^n k_c(\theta_i) \quad (17),$$

n – кількість паралельних зон у ширині w ; w – половина повної ширини; m – кількість зон

5. Ширина пошкодженої зони перерізу балок, плит або інших зігнутих елементів:

$$a_z = w \left[1 - \frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right] \quad (18),$$

$k_c(\theta_M)$ – коефіцієнт зниження бетону в найменш нагрітій точці.

6. Для колон, стін та інших елементів конструкцій зі стискальними навантаженнями ширину пошкодженої зони визначити за формулою:

$$a_z = w \left[1 - \left(\frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right)^{1,3} \right]. \quad (19).$$

На підставі розрахунків отримано результати оцінювання вогнестійкості залізобетонних конструкцій, зокрема для балок із різними параметрами. У разі, коли межі вогнестійкості не досягнуто, буде зазначено ресурс несучої здатності, що залишився. За отриманими значеннями максимальних моментів побудовано графіки зниження несучої спроможності несучих елементів залізобетонних будівельних конструкцій.

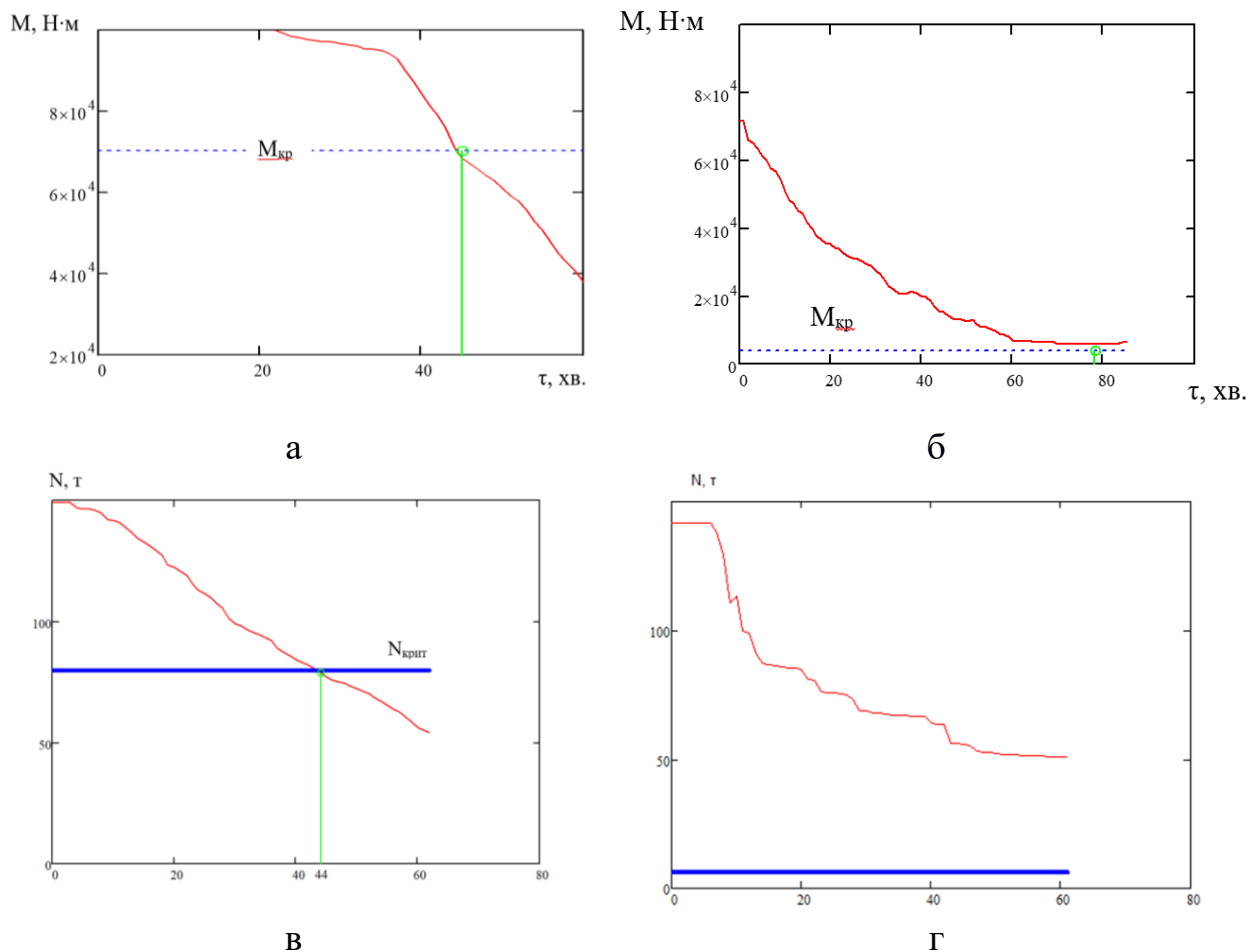


Рисунок 33 – Графіки зниження несучої спроможності несучих елементів залізобетонних будівельних конструкцій: а – балки довжиною 4,75 м із навантаженням $2,5 \text{ т/м}^2$; б – плити довжиною 6 м із навантаженням $2,5 \text{ т/м}^2$; в – колони висотою 2,4 м із навантаженням 80 т; г – стіни довжиною 4 м із навантаженням 300 т

Згідно з рис. 33, у разі зі стіною межі вогнестійкості не досягнуто. Це можна пояснити тим, що в стін є односторонній обігрів й арматура з необігрівального боку продовжує виконувати свої функції.

Отже, на підставі отриманих даних, описаних у шостому розділі, обґрунтовано комплекс методик обчислення несучої здатності елементів залізобетонних будівельних конструкцій за результатами відновлення температурних полів у їхніх перерізах, що дає змогу оцінити межу вогнестійкості несучих будівельних конструкцій точніше за наявні методи. Після розрахунків

для всіх основних видів несучих залізобетонних конструкцій удосконалено методичну й експериментальну базу дослідження напружено-деформованого стану будівельних конструкцій, під час вогневих випробувань і розрахунків з оцінювання вогнестійкості. Це вможливило перехід до виконання останнього завдання – синтезу всіх проведених досліджень і розроблених методик та створення єдиної експериментально-розрахункової системи.

Результати, отримані під час досліджень та описані в розділі 6, опубліковано в наукових працях [25–26; 34; 36–39; 46; 53–54; 60; 68–69].

У цьому розділі «Система оцінювання вогнестійкості несучих елементів залізобетонних будівельних конструкцій із використанням малогабаритних вогневих печей» узагальнено наукові результати, створено систему оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій, що зважає на спільну дію механічного й теплового навантаження, а отже, сприяє розв'язанню проблеми гарантування нормативного часу вогнестійкості під впливом температурного режиму пожежі.

У загальному вигляді створена система оцінювання вогнестійкості несучих елементів залізобетонних будівельних конструкцій – це комплекс експериментальних і розрахункових процедур, що засновані на розроблених методиках для визначення межі вогнестійкості елемента залізобетонних конструкцій або перевірки його відповідності нормованому часу.

У спрощеному вигляді систему представлено на рис. 34.

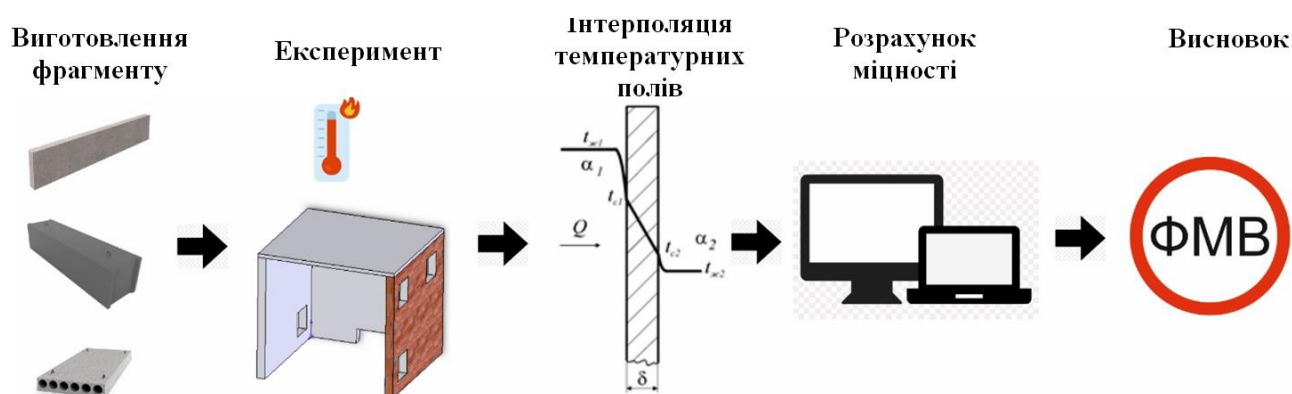


Рисунок 34 – Загальна схема системи оцінювання вогнестійкості несучих елементів залізобетонних будівельних конструкцій

Система оцінювання вогнестійкості несучих елементів залізобетонних будівельних конструкцій має взаємопов'язані елементи. Спеціально розроблено та створено низку експериментальних і розрахункових методик для кожного з основних видів елементів залізобетонних конструкцій, схарактеризовано взаємодію між ними. У цьому розділі описано кожен такий елемент і продемонстровано, як вони пов'язані. На рис. 35 у більш широкому вигляді представлено систему з її елементами та зв'язками між ними.



Рисунок 35 – Система оцінювання вогнестійкості несучих елементів залізобетонних будівельних конструкцій

Розроблена експериментально-розрахункова система може бути використана для всіх основних видів несучих конструкцій. На межі експериментів і розрахунків (рис. 34 – 35) перебуває процес відновлення температурних полів

усередині конструкцій, що дає змогу перейти від точкових замірів температури до розрахунку, який бере до уваги спільну дію силових і температурних навантажень.

В експериментальній частині використано фрагменти конструкції з тих самих матеріалів, із яких будуть виготовлені повномасштабні конструкції. Нагрівання відбувається в спеціальній малогабаритній печі. Прототип універсальної установки науково обґрунтовано й виготовлено в процесі роботи, описано місця та види засобів вимірювальної техніки, доведено важливість відтворюваності результатів. За отриманими результатами виконують розрахунок вогнестійкості, з огляду на реальні габарити будівельних конструкцій, величину та спосіб навантаження на них.

Спочатку проводять вогневі випробування фрагменту в печі розміром 1*1 м, потім за точковими значеннями температури розраховують температурні поля. На основі цих полів для кожної конструкції розроблено алгоритм, за яким визначено 3 показники вогнестійкості (несуча, теплоізоляційна, цілісність). Найменший показник – межа вогнестійкості. На рис. 35 представлено повний схематичний вигляд системи.

Експериментальні дані обробляють і перевіряють залежно від виду конструкції. За отриманими результатами відновлюють температурні поля всередині конструкцій, далі проводять розрахунок вогнестійкості, зважаючи на вид, реальні габарити несучих будівельних конструкцій, величину та спосіб навантаження на них, тобто на спільну температурно-силову дію на несучі залізобетонні конструкції реальних розмірів, що забезпечує відтворюваність результатів.

Систематизований метод ефективніший за випробування вогнестійкості, оскільки менш трудомісткий, більш екологічний і точний. Особливість полягає в тому, що такий метод бере до уваги навантаження та згинальний момент у процесі математичних розрахунків. Також у моделі закладено реальний розмір несучої залізобетонної конструкції, що не обмежений габаритами випробувальної установки.

Ефективність розробленої системи методів експериментально-розрахункового оцінювання межі вогнестійкості, порівняно з розрахунковими методами, аргументована використанням і нагріванням реальних будівельних матеріалів, із яких виготовляють фрагменти конструкцій. Це дає змогу уникнути похибки щодо усереднення значень коефіцієнтів прогріву конструкції під час розрахунків.

Отже, за результатами, викладеними в розділі 7, уперше розроблено й науково обґрунтовано експериментально-розрахункову систему оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій, що зважає на спільну дію силових і температурних навантажень. Розроблення й використання цієї системи розв'язує проблему гарантування межі вогнестійкості основних несучих будівельних конструкцій у разі пожежі.

Результати, отримані під час досліджень та викладені в розділі 7, опубліковано в наукових працях [25–28; 46; 54, 69].

ВИСНОВКИ

Дисертація являє собою завершене наукове дослідження, присвячене розв'язанню актуальної проблеми – гарантування нормативного часу вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій під впливом температурного режиму пожежі через створення системи оцінювання з використанням малогабаритних модульних вогневих печей, яка об'єднує експериментальні й розрахункові методи визначення вогнестійкості, виявлення закономірностей між тепловими процесами та напружено-деформованим станом в елементах цих конструкцій. Це слугує науковою основою для забезпечення необхідного часу евакуації людей та роботи підрозділів ОРС ЦЗ у разі пожежі. Одержано низку наукових і практичних результатів, що викладені нижче.

1. Проаналізовано сучасні підходи до оцінювання вогнестійкості елементів будівельних конструкцій та окреслено актуальні дослідницькі напрями. Доведено перспективність поєднання експериментальних і розрахункових методів. Експериментальна частина здатна врахувати особливості виготовлення матеріалу, а розрахункова – механічний вплив на повногабаритну конструкцію при температурних навантаженнях.

2. Забезпечено відтворюваність результатів теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі на несучі залізобетонні будівельні конструкції, завдяки виявленню закономірностей зміни температурних полів у перерізах елементів конструкцій. Це дало змогу розробити ефективні схеми розташування термопар у їхніх перерізах, зменшити кількість засобів виміральної техніки в експериментальних дослідженнях із нагрівання колон та балок до 50 %, порівняно з чинними нормативними вимогами. Підтверджено необхідний рівень достовірності результатів через порівняння розрахунків за різними методами інтерполяції температур для основних видів несучих залізобетонних конструкцій. Відсоток похибки щодо експериментальних даних такий: для стін і плит – 14 та 4 %; для колон – 10,2; 5,8 і 4,4 %; для балок – 17 та 11 % за використання різних підходів.

3. Встановлено закономірності залежності дисперсії температур у камері вогневої печі (S^2) від об'єму її камери (V), відстані від пальників до поверхні досліджуваного фрагменту несучої залізобетонної будівельної конструкції (l) та висоти, на якій розташований отвір для виходу продуктів горіння (h), у вигляді:

$$S^2 = 4221 + 4133 \cdot h - 2555 \cdot l - 1220 \cdot V - 800 \cdot V \cdot l - 5513 \cdot V \cdot h - 5150 \cdot l \cdot h + 7875 \cdot V \cdot l \cdot h.$$
 Обґрунтовано параметри камери вогневої печі й розміщення її ключових елементів. Методом комп'ютерного моделювання доведено, що для універсальності є доцільним створення камери печі кубічної форми з внутрішніми розмірами $1 \times 1 \times 1$ м, так як відтворюваність результатів не порушується. Достатньо двох газових пальників зі змінним розміщенням для мінімізації дисперсії температур по обігрівальних поверхнях фрагментів залізобетонних конструкцій.

4. На основі отриманих даних створено ескіз і побудовано реальну установку для проведення експериментальної частини загальної системи оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій під

впливом стандартного температурного режиму пожежі, що здатна забезпечити високий ступінь відтворюваності експериментальних даних.

5. Обґрунтовано методики проведення експериментів із нагрівання кожного виду малогабаритних фрагментів залізобетонних будівельних конструкцій за стандартним температурним режимом пожежі без механічного навантаження, що дало змогу визначити необхідні мінімальні розміри зразків та способи установаження їх у камеру печі. Проведено 12 вогневих експериментальних досліджень впливу стандартного температурного режиму пожежі на фрагменти несучих залізобетонних будівельних конструкцій (3 експерименти для кожного з видів конструкцій), під час яких зафіксовано характерні для залізобетону процеси виділення вологи та пари. Отримано відомості щодо прогрівання всіх необхідних даних для проведення розрахункової частини.

6. Підтверджено гіпотезу стосовно відтворюваності й достовірності результатів за допомогою перевірки адекватності експериментальних даних, обчислення критеріїв адекватності та визначення відносної похибки між отриманими результатами. Збіжність отриманих даних становить для плити 4,0 %; для стіни – 3,6 %; для колони – 4,0 %; для балки – 7,9 %.

7. Обґрунтовано комплекс методик обчислення несучої здатності елементів залізобетонних будівельних конструкцій за результатами відновлення температурних полів у їхніх перерізах, що дає змогу оцінити межу вогнестійкості несучих будівельних конструкцій точніше за наявні методи (на 9,5 % точніше для стін; на 3 % – для плит; на 9,5% – для балок; на 8,3 % – для колон).

8. Узагальнення наукових результатів уможливило створення системи оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій з використанням малогабаритних модульних вогневих печей, що бере до уваги спільну дію механічного й теплового навантаження, посприявши розв'язанню проблеми гарантування нормативного часу вогнестійкості під впливом температурного режиму пожежі.

Список публікацій, що відображають основні наукові результати дисертації

Статті у періодичних виданнях, включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України, або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Scopus та/або Web of Science Core Collection

1. **Nuianzin O.**, Pozdieiev S., Hora V., Shvydenko A., Samchenko T. Cable tunnels temperature fire mode experimental study. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Т. 3. Р. 21–28.
2. Pozdieiev S., **Nuianzin O.**, Binetska O., Borsuk O., Shvydenko A., Alimov B. Temperature effect on the thermal-physical properties of fire-protective mineral wool cladding of steel structures under the conditions of fire resistance tests. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Т. 4 (12–106). Р. 39–45.

3. Pozdieiev S., Nizhnyk V., Feshchuk Y., Nekora V., **Nuianzin O.**, Shnal T. Investigation of the influence of the configuration of the fire furnace chamber on the temperature regime during the implementation of tests for fire resistance. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 4 (1), 112. P. 34–40.

4. **Nuianzin O.** Pozdieiev S., Sidnei S., Kostenko T., Borysova A., Samchenko T. Increasing the Efficiency and Environmental Friendliness of Fire Resistance Assessment Tools for Load-Bearing Reinforced Concrete Building Structures. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2023. №4. P.138–146.

Статті в наукових періодичних виданнях інших держав

5. Pozdieiev S. V., Nizhnyk V. V., Ballo Y. V., **Nuianzin O. M.**, Uhanskyu R. V., Kropyvnytskiy V. S. Обґрунтування безпечної протипожежної відстані між ферментаторами для виробництва біогазу. *Safety & Fire Technology*. Poland, 2018. Т. 51 (3). С. 60–67.

6. **Нуянзін О. М.** Дослідження впливу втрати цілісності вогнезахисного покриття на межу вогнестійкості сталевий балки. *The Scientific Heritage*. Hungary, 2021. № 76 (1). С. 56–61.

7. Перегін А. В., **Нуянзін О. М.**, Заїка Н. П., Ведула С. А. Методика створення прототипу компактної вогневої установки для проведення випробувань на визначення вогнестійкості залізобетонних конструкцій. *The Scientific Heritage*. Hungary, 2021. № 78 (1). С. 37–43.

Статті в наукових виданнях, що входять до Переліку наукових фахових видань України

8. **Нуянзін О. М.**, Некора О. В., Сідней С. О. Аналіз існуючих математичних моделей тепломасообміну у камерах вогневих печей установок для випробувань на вогнестійкість несучих стін. *Збірник наукових праць «Пожежна безпека: теорія і практика»*. Черкаси, 2014. № 18. С. 13–18.

9. **Нуянзін О. М.**, Поздєєв С. В., Сідней С. О. Вплив конструктивних особливостей вогневих печей на достовірність результатів випробувань стін на вогнестійкість. *Науковий вісник УкрНДІЦЗ*. Київ, 2015. № 1 (31). С. 4–12.

10. **Нуянзін О. М.**, Поздєєв С. В., Нуянзін В. М., Сідней С. О. Математичне моделювання процесу тепломасообміну у камерах вогневих печей установок для випробувань на вогнестійкість несучих стін. *Збірник наукових праць «Пожежна безпека: теорія і практика»*. Черкаси, 2015. № 20. С. 30–37.

11. Сідней С. О., **Нуянзін О. М.**, Тищенко О. М. та ін. Дослідження прогріву залізобетонної стіни за умов нерівномірного теплового впливу при її випробуваннях на вогнестійкість. *Збірник наукових праць «Пожежна безпека: теорія і практика»*. Черкаси, 2016. № 21. С. 16–23.

12. **Нуянзін О. М.**, Кришталь М. А., Болжаларський К. В., Сідней С. О. Дослідження впливу конфігурації вогневої печі на рівномірність температурного поля по обігрівальній поверхні залізобетонної стіни при її випробуваннях на вогнестійкість. *Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека*. Черкаси, 2016. № 1. С. 38–43.

13. **Нуянзін О. М.**, Поздєєв С. В., Сідней С. О., Кришталь М. А. Дослідження впливу дисперсії температур по обігрівальній поверхні несучих стін на значення їхньої межі вогнестійкості. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. Черкаси, 2017. № 1. С. 89–100.

14. **Нуянзін О. М.**, Кришталь М. А., Кришталь Д. О., Рога М. П. Дослідження рівномірності прогріву несучої стіни в залежності від конструкції та дизайну вогневої печі. *Вісті Донецького гірничого інституту*. Покровськ: ДонНТУ, 2017. № 1 (1). С. 34–39.

15. Костенко В. К., Нестеренко А. А., **Нуянзін О. М.**, Покалюк В. М. Математична модель теплообміну в ізоляційному одязі з системою охолодження та без неї. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. Черкаси, 2017. № 1. С. 42–49.

16. Поздєєв С. В., Шеверєв Є. Ю., Самченко Т. В., **Нуянзін О. М.** Дослідження впливу пожежного навантаження на температурний режим пожежі у кабельному тунелі. *Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека*. Київ, 2018. № 1 (5). С. 13–19.

17. **Нуянзін О. М.**, Самченко Т. В., Поздєєв С. В., Кришталь М. А., Ведула С. А. Дослідження температурних режимів пожежі у кабельних тунелях за їх різних параметрів. *Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека*. Київ, 2019. № 1 (7). С. 13–26.

18. **Нуянзін О. М.**, Самченко Т. В., Перегін А. В., Кришталь В. М. Повний факторний експеримент з визначення температурних режимів пожежі у кабельних тунелях. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. Черкаси, 2019. № 3 (2). С. 83–89.

19. Перегін А. В., **Нуянзін О. М.**, Кришталь М. А., Заїка П. І. Комп'ютерне моделювання процесу тепломасообміну у камерах вогневих печей установок для випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. Черкаси, 2020. № 4 (1). С. 72–79.

20. Борсук О. В., **Нуянзін О. М.**, Кришталь В. М., Ведула С. А., Горовенко М. М. Дослідження межі вогнестійкості сталеві балки за умови втрати цілісності вогнезахисного покриття. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. Черкаси, 2020. № 4 (2). С. 5–15.

21. Поздєєв С. В., **Нуянзін О. М.**, Сідней С. О., Новгородченко А. Ю., Борсук О. В. Дослідження нагрівання сталевих двотаврових стержнів із

мінераловатним вогнезахисним облицюванням в умовах стандартного температурного режиму пожежі. *Геотехнічна механіка*. 2020. № 152. С. 116–126.

22. **Нуянзін О. М.**, Гвоздь В. М., Поздєєв С. В., Некора О. В., Борсук О. В. Дослідження залежності часу відшарування вогнезахисного мінераловатного облицювання сталеві балки від коефіцієнту перерізу та коефіцієнту навантаження. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. Черкаси, 2021. № 5 (1). С. 96–103.

23. **Нуянзін О. М.** Дослідження нагрівання вогнезахисних сталевих двотаврових стержнів при випробуваннях за стандартним температурним режимом пожежі. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. Черкаси, 2021. № 5 (2). С. 67–74.

24. **Нуянзін О. М.**, Самченко Т. В., Нуянзін В. М., Майборода А. О. Наукове обґрунтування методу розрахункової оцінки класу вогнестійкості будівельних конструкцій кабельних тунелів. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. Київ, 2021. № 2 (12). С. 20–29.

25. **Нуянзін О. М.** Дослідження теплового впливу пожежі на залізобетонну балку за результатами експериментальних випробувань. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. Черкаси, 2022. № 6 (1). С. 75–84.

26. **Нуянзін О. М.**, Заїка П. І., Черниш Р. А., Ведула С. А. Розрахункова оцінка межі вогнестійкості залізобетонної балки за результатами вогневих випробувань без механічного навантаження. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2022. № 6 (2). С. 82–94.

Патенти на корисну модель

27. Тищенко О. М., Поздєєв С. В., **Нуянзін О. М.**, Сідней С. О., Кришталь Д. О. Вертикальна вогнева піч для проведення випробувань на вогнестійкість із рівномірним прогрівом будівельних конструкцій. *Патент України на корисну модель № 138081*, опубл. 25.11.2019, Бюл. № 25.

28. **Нуянзін О. М.** Компактна вогнева установка для проведення випробувань на визначення вогнестійкості відносно рівномірності прогріву малогабаритних будівельних конструкцій. *Патент України на корисну модель № 151322*. Зареєстровано в Державному реєстрі України корисних моделей 06.07.2022.

29. Перегін А. В., **Нуянзін О. М.**, Гвоздь В. М., Тищенко О. М., Некора О. В., Кришталь М. А. Спосіб інтерполяції температурних розподілень у залізобетонних балках на основі вимірювань температури у контрольних точках. *Патент України на корисну модель № 152662*. Зареєстровано в Державному реєстрі України корисних моделей 29.03.2023.

Монографії

30. Методи математичного моделювання теплових процесів при випробуваннях на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій / **Нуянзін О. М.**, Некора О. В., Поздєєв С. В. [та ін.]. Черкаси: *ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України*, 2015. 120 с.

31. Достовірність результатів вогневих випробувань при оцінюванні межі вогнестійкості несучих стін / **Нуянзін О. М.**, Сідней С. О., Поздєєв С. В. [та ін.]. Черкаси: *Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України*, 2021. 100 с.

Статті, які додатково відображають наукові результати дисертації

32. **Nuianzin O.**, Pozdeev S., Nuianzin V. Research of adequacy of mathematical model of heat -mass exchange in the furnace on fire resistance of hearing walls. *Polytechnical journal «Metallurgical and Mining Industry»*. Дніпро, 2016. № 8. С. 68–77.

33. **Нуянзін О. М.**, Поздєєв С. В., Самченко Т. В., Кришталь М. А. Дослідження адекватності математичної моделі тепломасообміну при пожежі у кабельному тунелі. *Проблеми пожежної безпеки*. Харків, 2018. № 43. С. 119–128.

34. Perehin A., **Nuianzin O.**, Kryshstal D., Kryshstal M. Аналіз результатів прогрівання малогабаритного фрагмента залізобетонної стіни під час експериментальних досліджень. *Civil security: Public administration and crisis management*. Київ, 2022. № 1. С. 19–36.

Наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації

35. **Нуянзін О. М.**, Поздєєв С. В., Нешпор О. В. Дослідження впливу вимірювальних приладів на достовірності результатів вогневих випробувань. *Матеріали 16 Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників*, м. Київ, 2014. С. 211–212.

36. **Нуянзін О. М.**, Поздєєв С. В., Некора О. В., Нешпор О. В. Вплив дисперсії температур на обігрівальних поверхнях залізобетонних плит на їхню межу вогнестійкості. *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції: Надзвичайні ситуації безпека та захист*, м. Черкаси, 2014. С. 86–87.

37. **Нуянзін О. М.**, Пальчинська В. С., Яковенко А. С. Дослідження адекватності математичної моделі тепломасообміну випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій. *Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку забезпечення безпеки життєдіяльності»*, м. Львів, 2015. С. 45–46.

38. **Нуянзін О. М.**, Поздєєв С. В., Сідней С. О., Федченко І. В. Вплив конструктивних особливостей вогневих печей на достовірність результатів

випробувань стін на вогнестійкість. *Матеріали 17 Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників*, м. Київ, 2015. С. 282–284.

39. **Нуянзін О. М.**, Поздєєв С. В., Сідней С. О., Кропива М. О. Вплив вимірювальних приладів на адекватність результатів випробувань на вогнестійкість несучих стін. *Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції: Надзвичайні ситуації безпека та захист*, м. Черкаси, 2015. С. 108–110.

40. **Нуянзін О. М.**, Покалюк В. М., Майборода А. О. Обчислювальний експеримент випробувань на вогнестійкість несучих стін. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції: Прикладні аспекти техногенно-екологічної безпеки*, м. Харків, 2015. С. 25–26.

41. **Нуянзін О. М.**, Кришталь М. А., Карпенко В. Ю. Вплив конфігурації вогневої печі на рівномірність прогріву несучої стіни при її випробуваннях на вогнестійкість. *Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції Надзвичайні ситуації безпека та захист*, м. Черкаси, 2015. С. 12–13.

42. **Нуянзін О. М.**, Сідней С. О., Поздєєв С. В. Обчислювальний експеримент по дослідженню рівномірності прогріву несучої залізобетонної стіни при її випробуваннях на вогнестійкість. Пожежна та техногенна безпека. *Теорія, практика, інновації: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Львів, 2016. С. 511–512.

43. Болжаларський К. В., Кришталь М. А., **Нуянзін О. М.**, Сідней С. О. Дослідження рівномірності прогріву несучої стіни при її випробуваннях на вогнестійкість. *Матеріали 18 Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників*, м. Київ, 2015. С. 55–56.

44. **Нуянзін О. М.**, Поздєєв С. В., Сідней С. О., Некора О. В. Математичне моделювання процесу тепломасообміну у камерах вогневих печей установок для випробувань на вогнестійкість несучих стін. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: збірник VII-ї Міжнародної науково-практичної конференції*. Чернігів, 2017. С. 117–118.

45. Pozdieiev S., **Nuianzin O.**, Sidnei S. Bearing walls fire resistance tests efficiency computational study using different configurations of combustion furnaces. *In XVIII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering, production engineering and physics»*. Series: Monografie Nr68. Czestochowa, 2017, P. 439–444.

46. **Нуянзин А. М.**, Кришталь Н. А., Кришталь Д. О. Определение несущей способности железобетонных стен методом конечных элементов. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси, 2017. С. 219–220.

47. **Нуянзін О. М.**, Поздєєв С. В., Кришталь М. А. Конструкція горизонтальної вогневої печі для забезпечення достовірності результатів

випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій. *Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку: матеріали 19 Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників*, м. Київ, 2017. С. 318–320.

48. Pozdieiev S., Nuianzin O., Sidnei S., Shchipets S. Computational study of bearing walls fire resistance tests efficiency using different combustion furnaces configurations. *In MATEC web of conferences (Scopus & WoS) (Vol. 116, p. 02027). EDP Sciences. 6th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings» (Transbud-2017)*. Kharkiv, 2017. P. 02027.

49. **Nuianzin O.**, Kryshthal M., Nesterenko A., Kryshthal D., Samchenko T. Investigation of the regularities of temperature regime of fire in cable tunnels depending on its parameters. *In MATEC Web of Conferences (Scopus) (Vol. 230, p. 02022). EDP Sciences. 7th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings» (Transbud-2018)*. Kharkiv, 2018. P. 02022.

50. Кришталь М. А., Кришталь Д. О., **Нуянзін О. М.** Сучасні засоби визначення значення межі вогнестійкості будівельних конструкцій. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси, 2018. С. 178–179.

51. **Nuianzin, O.**, Tyshchenko, O., Zhartovskyi, S., Zaika, P., Peregin, A. The research of carrying capacity of reinforced concrete walls under uneven warming. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Scopus)*. – IOP Publishing, 2019. Т. 708. №. 1. С. 012063.

52. **Нуянзін О. М.**, Діденко В. В. Уточнений метод розрахункової оцінки межі вогнестійкості залізобетонної плити. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. С. 131–134.

53. Shnal T., Pozdieiev S., **Nuianzin O.**, Sidnei S. Improvement of the assessment method for fire resistance of steel structures in the temperature regime of fire under realistic conditions. *Materials Science Forum (Scopus). Trans Tech Publications Ltd*, 2020. Т. 1006. С. 107–116.

54. **Нуянзін О. М.**, Кришталь М. А., Литвиненко М. В. Обґрунтування методу відновлення температурного поля у перерізі залізобетонної колони за показниками у контрольних точках. *Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси, 2020. С. 165–166.

55. Перегін А. В., **Нуянзін О. М.** Аналіз результатів моделювання тепломасообміну у камерах вогневих печей. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: матеріали X Всеукр. наук.-практ. конф.* Черкаси, 2020. С. 198–199.

56. Поздеев С. В., **Нуянзін О. М.**, Борсук О. В., Неділько І. А. Дослідження цілісності вогнезахисного мінераловатного облицювання сталеві балки в умовах пожежі. *Енергоефективність на транспорті: Міжнар. наук.-практ. конф.* Харків, 2020. С. 98–100.

57. **Nuianzin O.**, Sidnei S., Zayika P., Fedchenko S., Alimov B. Determining the Dependence of Fire Parameters in a Cable Tunnel on its Characteristics. *Materials Science and Engineering (Scopus)*. 2021. Vol. 1021. № 1. P. 012023.

58. Pozdieiev S., **Nuianzin O.**, Borsuk O., Nedilko I. Research of Integrity of Fire Insulation Cladding with Mineral Wool of Steel Beam under Fire Impact. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Scopus)*, 2021. Vol. 1021. № 1. P. 012024.

59. Перегін А., **Нуянзін О.** Моделювання комп'ютерної моделі вогневої печі за допомогою системи автоматизованого проектування. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції.* Черкаси, 2021. С. 211–212.

60. **Нуянзін О. М.**, Перегін А. В., Шналь Т. М., Щіпець С. Д., Мирошник О. М. Експериментальне дослідження розподілів та міцнісних характеристик малогабаритного фрагменту. *Збірник тез доповідей 9-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті».* Харків, 2021. С. 89–90.

61. Перегін А., Кришталь Д., **Нуянзін О.** Аналіз температурних розподілів у камері вогневої печі при випробуванні залізобетонної плити на вогнестійкість. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю.* Черкаси, 2021. С. 177–178.

62. **Нуянзін О. М.**, Поздеев С. В., Некора О. В., Борсук О. В. Оцінка межі вогнестійкості сталеві балки при втраті цілісності вогнезахисного покриття. *Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми надзвичайних ситуацій».* Харків, 2021. С. 45–46.

63. Діденко Т., Перегін А., **Нуянзін О.** Малогабаритна вогнева установка для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: матеріали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю.* Черкаси, 2022. С. 91–92.

64. **Нуянзін О.**, Черниш Р., Ведула С. Експеримент з дослідження теплового впливу пожежі на залізобетонну балку. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: матеріали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю.* Черкаси, 2022. С. 127–128.

65. **Нуянзін О.**, Кришталь М., Прокопець А. Дослідження точності та достовірності результатів розрахунку прогрівання сталевих стержнів із мінераловатним вогнезахисним облицюванням. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси, 2022. С. 167–169.

66. Перегін А., **Нуянзін О.**, Діденко Т. Верифікація даних отриманих під час експериментів з нагрівання малогабаритних елементів залізобетонних стін. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси, 2022. С. 169–170.

67. **Нуянзін О.**, Перегін А., Борисова А., Нуянзін В. Результати експериментальних досліджень елементів залізобетонної стіни за стандартним температурним режимом пожежі. *Problems of Emergency Situations: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Харків, 2022. С. 40–41.

68. **Nuianzin O.**, Pozdieiev S., Borsuk O., Nekora O. Investigation of the Limit of Fire Resistance of a Steel Beam at Loss of Integrity of a Fire-Resistant Lining. *Materials Science Forum: Trans Tech Publications Ltd. (Scopus)*, 2021. Vol. 1038. P. 345–351.

69. Perehin A., **Nuianzin O.**, Borysova A., Nuianzin V. Results of Experimental Investigations of Reinforced Concrete Wall Elements According to the Standard Temperature Mode of Fire. *Materials Science Forum: Trans Tech Publications Ltd. (Scopus)*, 2022. Vol. 1066. P. 206–215.

АНОТАЦІЯ

Нуянзін О. М. Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій з використанням малогабаритних модульних вогневих печей. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.02 «Пожежна безпека» (261 – Пожежна безпека). – Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Черкаси, 2023.

Роботу присвячено розв'язанню актуальної науково-прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки – гарантування нормативного часу вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій під впливом температурного режиму пожежі за допомогою створення системи оцінювання, яка об'єднує експериментальні й розрахункові методи визначення їхньої вогнестійкості з використанням малогабаритних модульних вогневих печей через виявлення закономірностей між тепловими процесами та напружено-деформованим станом в елементах цих конструкцій, слугуючи науковою основою для забезпечення необхідного часу евакуації людей і роботи підрозділів ОРС ЦЗ у разі пожежі.

Ключові слова: вогнестійкість, залізобетон, температура, несуча будівельна конструкція, система, малогабаритна вогнева установка, інтерполяція, математична модель, розрахунок, експеримент.

SUMMARY

Nuianzin O. M. Development of the scientific basis for evaluating fire resistance of reinforced concrete building structures using small-sized modular fire furnaces. – Qualification scientific paper which is typescript.

Dissertation work for the competition of the scientific degree of Doctor of Sciences (Engineering) specialty 21.06.02 – «Fire safety» (261 – Fire safety). – Cherkasy Institute of Fire Safety Named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Defence of Ukraine, Cherkasy, 2023.

The dissertation is devoted to the solution of an actual scientific and applied problem in the field of fire safety - guaranteeing the standard time of fire resistance of load-bearing reinforced concrete building structures under the influence of the temperature regime of fire by creating an evaluation system that combines experimental and calculation methods for determining their fire resistance by identifying regularities between thermal processes and the stress-deformed state in the elements of these structures, which is the scientific basis for ensuring the necessary time for the evacuation of people and the work of the units of Operative and rescue service of civil protection of Ukraine in case of a fire.

To determine the limits of fire resistance in modern conditions, the following are used: full-scale fire tests, the method of tests in special fire test furnaces, experimental-calculation and calculation methods. However, full-scale fire tests are not cost-effective and are extremely rare, even in the most developed countries. Fire tests and parameters of modern test facilities are far from perfect, as there are errors due to the fact that the control of the fuel system and the configuration of the fire furnaces do not ensure full compliance of the conditions of the experiment with the requirements of the standards in this field. In addition, large-sized furnaces are not environmentally friendly, labor-intensive and not always economically feasible. Calculation methods are not able to provide the necessary accuracy, since it is impossible to take into account the characteristics of the behavior of multi-composite material of building structures when heated.

Based on the results of this work, an experimental and calculation system for assessing the fire resistance of load-bearing reinforced concrete building structures was scientifically substantiated and created, which takes into account the combined effect of force and temperature loads, due to the combination of experimental studies on the temperature effect on small-sized fragments of the elements of these structures in a special universal small-sized fire installation and calculation methods for the interpretation of experimental results, mathematical models that describe the stress-deformation state of load-bearing reinforced concrete building structures under the influence of the standard fire temperature regime and take into account the real dimensions of the structures.

The configuration, design parameters were substantiated, and sketches of a compact fire installation able to ensure the reproducibility of the results of thermal effects on all main types of load-bearing reinforced concrete structures were developed, which made it possible to create methods for conducting experimental studies of

samples. The regularity of the dependence of the temperature dispersion in the chamber of the fire furnace on the volume of its chamber, the distance from the burners to the surface of the investigated fragment of the load-bearing reinforced concrete building structure and the height at which the opening for the exit of combustion products is located was established, which made it possible to create a configuration of a universal experimental installation for conducting fire tests and build it on the basis of an educational institution.

In the course of the work, 12 fire experimental studies of the influence of the standard fire temperature regime on fragments of load-bearing reinforced concrete building structures were conducted (3 experiments for each type of structure), during which the processes of moisture and steam release characteristic of reinforced concrete were observed. The hypothesis regarding the reproducibility and reliability of the results was confirmed by checking the adequacy of the experimental data by calculating the adequacy criteria and determining the relative error between the obtained results. The convergence of the obtained data was: for the slab – 4.0%; for the wall – 3.6%; for the column – 4.0%; for the beam – 7.9%.

In the process of work, computational interpolation algorithms were defined and substantiated for the restoration of temperature fields in load-bearing reinforced concrete building structures based on temperature indicators at certain points inside the structures during fire tests, which made it possible to determine a more effective scheme for the location of thermocouples in cross-sections of fragments of load-bearing reinforced concrete building structures.

The scientific and methodological base in the field of fire safety at construction sites was improved for a more accurate assessment of the fire resistance of reinforced concrete building structures, by optimizing the elements of the general system and simplifying the means of conducting fire tests due to the use of small-sized fire furnaces, which ensure the reproducibility of experimental studies. The developed methodological base is the basis for the creation of regulatory support for assessing the fire resistance of building structures using experimental and calculation methods.

The practical value of the research lies in the development of an experimental-calculation system for evaluating the fire resistance of load-bearing reinforced concrete building structures by combining fire tests in small-sized installations without load and calculation methods that take it into account, and as a result has a lower cost and labor intensity compared to existing methods.

In general, the created system for evaluating the fire resistance of load-bearing elements of reinforced concrete building structures is a set of experimental and calculation procedures based on developed methods for determining the limit of fire resistance of an element of reinforced concrete structures or checking its compliance with the standard time.

Key words: fire resistance, reinforced concrete, temperature, load-bearing building structure, system, small fire installation, interpolation, mathematical model, calculation, experiment.