

Національний університет цивільного захисту України
Державної служби України з надзвичайних ситуацій

Національний університет цивільного захисту України
Державної служби України з надзвичайних ситуацій

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОВАЛЬОВ АНДРІЙ ІВАНОВИЧ

УДК 614.841.343

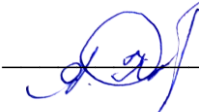
ДИСЕРТАЦІЯ
РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ
ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬНИХ
КОНСТРУКЦІЙ

21.06.02 – пожежна безпека

21 – національна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 А.І. Ковальов

Науковий консультант: Отрош Юрій Анатолійович,
доктор технічних наук, професор

Харків – 2023

АНОТАЦІЯ

Ковальов А.І. Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – пожежна безпека (21 – національна безпека). Національний університет цивільного захисту України, ДСНС України, Харків, 2023.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої актуальної наукової проблеми у сфері пожежної безпеки, що полягає у недосконалому методів оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій, шляхом розробки і реалізації розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій з обґрунтованими параметрами та умовами експлуатації вогнезахисних покриттів.

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

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання наступних завдань:

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

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

– перевірити достовірність розроблених математичної моделі та

розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій;

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

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

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

Для розв'язання поставлених завдань застосовувались методи: комплексний аналіз раніше отриманих результатів щодо питань оцінювання та забезпечення вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних несучих будівельних конструкцій; наукове узагальнення та систематизація, аналіз вимог нормативних документів, методи експериментального дослідження поведінки зразків при нагріванні, числові методи скінчених елементів, скінчених різниць, а також напружено-деформованого стану в елементах будівельних конструкцій в умовах нагріву під час пожежі у числовій реалізації за методом скінчених елементів; експериментальні методи досліджень будівельних конструкцій при різних впливах, які базуються на передових методах досліджень конструкцій при випробуваннях із залученням сучасних приладів і обладнання; математичне та комп'ютерне моделювання процесів нестационарного теплообміну між факелом пожежі та будівельними конструкціями шляхом використання методу нестационарної теплопровідності; розв'язання прямих і обернених задач теплопровідності; метод «збурення» за допомогою генератора випадкових чисел; методи математичного моделювання процесів експлуатації, що дозволяють моделювати різні впливи, яким можуть бути піддані реальні конструкції; для обробки експериментальних даних та верифікації результатів

теоретичних досліджень були застосовані методи математичної статистики, метод планування експерименту.

У **вступі** обґрунтовано вибір теми дослідження, сформульовано мету та завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення роботи, представлено її загальну характеристику.

У **першому** розділі проведено аналіз сучасного стану забезпечення вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій, вимоги пожежної безпеки до будівельних конструкцій, проаналізовані надзвичайні ситуації та пожежі, які пов'язані з втратою вогнестійкості, а також сучасні підходи до забезпечення вогнестійкості. Проведено аналіз експериментальних та розрахункових методів оцінювання вогнестійкості незахищених та вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій. Визначено їх переваги та недоліки. Проведений аналіз дає змогу констатувати тенденцію поширення застосування розрахунково-експериментального методу для оцінювання меж вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій та вогнезахисної здатності покриттів для таких конструкцій. Визначено необхідність в розробці розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій. Аналіз показав наявність протиріч, що виникають в процесі аналізу умов забезпечення вогнестійкості вогнезахищених будівельних конструкцій. Розв'язання цих протиріч створює умови для безпечної експлуатації будівель та споруд з використанням вогнезахищених залізобетонних конструкцій з науково обґрунтованими параметрами їх вогнезахисних покриттів. На підставі аналізу встановлено, що забезпечення нормованого значення межі вогнестійкості несучих елементів залізобетонних будівельних конструкцій є важливою і досить складною проблемою, розв'язання якої дозволить на стадії проектування, будівництва та експлуатації будівель і споруд об'єктів промислового та цивільного будівництва застосовувати у сучасному будівництві будівельні конструкції, які здатні забезпечити будівлям чи

спорудам стійкість при високотемпературному та силовому впливі або при руйнуванні внаслідок порушення нормального циклу функціонування об'єкту.

У другому розділі розроблено математичну модель оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. При цьому застосовано алгоритм, що включає виконання таких етапів: вибір апарату формалізації, побудова зовнішнього опису, перевірка працездатності моделі, побудова внутрішнього стану, перевірка працездатності та ідентифікація параметрів. Сформульовані початкові та граничні умови при побудові зазначених моделей, які дозволяють з достатньою для інженерних розрахунків точністю прогнозувати вогнестійкість вогнезахисної залізобетонної конструкції. Особливістю розроблених моделей є врахування теплофізичних характеристик залізобетонних конструкцій та вогнезахисних покриттів, особливостей формування режимів пожежі, міцнісних та деформаційних властивостей матеріалів при впливі пожежі, нелінійні закони деформування матеріалів конструкції. Вперше виявлені закономірності впливу вологості, температури та твердих домішок в повітрі на значення коефіцієнту теплообміну між обігрівною поверхнею та повітрям навколишнього середовища за допомогою методу планування багатofакторного експерименту.

На основі запропонованої математичної моделі розроблено розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. Структурно-логічна схема реалізації розробленого методу передбачає 9 блоків розташованих на 5 рівнях, пов'язаних логічними зв'язками та включає експериментальну і розрахункову частини. Експериментальна частина методу передбачає проведення серії випробувань на вогнестійкість при заданих режимах пожежі (стандартний, зовнішньої, вуглеводневої, тунельної, реальної пожежі). Розрахункова частина містить наступні обов'язкові процедури: побудову розрахункової моделі фізичного процесу; ідентифікацію за даними випробувань на вогнестійкість теплофізичних характеристик моделі на основі розв'язання обернених задач теплопровідності; визначення характеристик вогнезахисної здатності покриттів

за результатами випробувань на вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій при різних умовах випробувань (температурні режими пожежі, умови закріплення, навантаження зразків, схему вимірювання температур, кліматичні фактори), розрахунок напружено-деформованого стану конструкції.

В третьому розділі перевірено достовірність розроблених математичної моделі та розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій використовуючи метод обчислювального експерименту, за допомогою якого визначено допустимі похибки. Встановлено, що випадкові похибки у 10 % при вимірюванні температур з необігрівної поверхні вогнезахисного перекриття суттєво впливають на точність визначення теплофізичних характеристик покриття (максимальна похибка до 30 %). Для аналізу чутливості запропонованої моделі використовувалась методика, яка полягає в послідовному збуренні параметрів моделі, ідентифікації теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів та розв'язанні серії прямих задач теплопровідності для отримання значень середньоквадратичного відхилення температури в часі і безпосередньому розрахунку коефіцієнтів чутливості. В результаті встановлено, що найбільший вплив на точність оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій мають такі параметрами математичної моделі як коефіцієнт теплопровідності вогнезахисного покриття і питома об'ємна теплоємність бетону залізобетонного перекриття. Виявлено вплив коефіцієнту тепловіддачі між необігрівною поверхнею перекриття і навколишнім середовищем при оцінюванні вогнестійкості вогнезахисних багатопустотних залізобетонних перекриттів на точність визначення теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття. Досліджено вплив температурного режиму пожежі на характеристику вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів для забезпечення вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. При цьому встановлено, що різниця між значеннями мінімально необхідної товщини вогнезахисного покриття для стандартного температурного режиму та температурного режиму вуглеводневої пожежі становить близько 12 %, а

різниця між значеннями необхідної товщини вогнезахисного покриття для стандартного температурного режиму та температурного режиму тунельної пожежі по стандартам Нідерландів (RWS) – 29 %

В **четвертому** розділі розроблено скінчено-елементні моделі для теплотехнічного та статичного розрахунків вогнезахисених залізобетонних конструкцій (на прикладі багатопустотного перекриття і колони) в програмному комплексі «ANSYS» та «ЛІРА-САПР». За допомогою розроблених моделей було проведено моделювання нестационарного прогріву та розрахунок напружено-деформованого стану вказаних конструкцій. Проведено порівняння результатів чисельного моделювання з результатами експериментального дослідження вогнестійкості. Запропоновано підхід, що дозволяє враховувати всі види теплообміну та навантаження шляхом задавання порожнин як твердого тіла з еквівалентним коефіцієнтом теплопровідності в багатопустотних перекриттях. Моделі дозволяють досліджувати стаціонарний та нестационарний прогрів як незахищених, так і вогнезахисених залізобетонних конструкцій. При визначенні достовірності розробленого методу, було проведено порівняння результатів чисельного моделювання прогріву вогнезахисених залізобетонних будівельних конструкцій з результатами їх експериментального дослідження вогнестійкості.

В **п'ятому** розділі розроблено комп'ютерні моделі теплового та напружено-деформованого стану будівлі трьохповерхового паркінгу для автомобілів, яка складається із вогнезахисених конструкцій, що враховують: теплофізичні характеристики вогнезахисних покриттів, теплофізичні та механічні властивості матеріалів, з яких складається конструкція, нелінійні закони деформування матеріалів моделі, механічні властивості матеріалів при високотемпературних та силових впливах. Модель дозволяє оцінити рівень пожежної безпеки об'єкта в частині забезпечення вогнестійкості і прийняти ефективні рішення щодо підвищення вогнестійкості конструкцій. Проаналізовані варіанти виникнення пожеж в паркінгу для дослідження вогнестійкості (стійкості) будівлі. Проведено моделювання нестационарного

прогріву залізобетонної колони паркінгу квадратного перерізу, розмірами $0,5 \times 0,5 \times 3$ м за умов впливу стандартної пожежі протягом 150 хвилин. Встановлено, що підходи щодо збільшення площі армування мають місце при проектуванні будівель та споруд, проте взагалі не прийнятні при експлуатації вже побудованих будівель та при необхідності підвищення меж вогнестійкості залізобетонних конструкцій до нормованих значень. Запропоновано заходи з підвищення меж вогнестійкості конструкцій, що полягають у використанні вогнезахисних покриттів з науково обґрунтованими параметрами.

В шостому розділі визначено економічну ефективність застосування методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій. Проведено техніко-економічне обґрунтування застосування вогнезахисених залізобетонних конструкцій з науково обґрунтованими товщинами вогнезахисних покриттів. Проведені розрахунки економічного ефекту від впровадження розробленого методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисених конструкцій на прикладі паркінгу для автомобілів. Встановлено, що витрати від використання підходу щодо підвищення вогнестійкості залізобетонних колон шляхом застосування вогнезахисних покриттів в 5 разів менші від витрат при використанні додаткового армування для підвищення межі вогнестійкості залізобетонної колони з 150 до 180 хвилин (економія 21 %).

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

ABSTRACT

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

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 21.06.02 – fire safety (21 – national security). National University of Civil Defense of Ukraine, State Emergency Service of Ukraine, Kharkiv, 2023.

The dissertation is devoted to the solution of an important current scientific problem in the field of fire safety, which consists in the imperfection of methods for assessing the fire resistance of building structures through the development and implementation of a calculation-experimental method for assessing the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete building structures with substantiated parameters and operating conditions of fire-resistant coatings.

The aim of the work is the development of the scientific foundations of ensuring the fire resistance of building structures by developing a computational and experimental method for evaluating the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete construction structures, buildings and structures under combined high-temperature and force effects as a prerequisite for increasing the level of fire safety of objects through their fire protection with justified parameters and conditions exploitation.

Achieving the set goal involves solving the following tasks:

- to analyze modern methods and approaches to ensure and evaluate the fire resistance of reinforced concrete building structures. Identify ways to increase the level of ensuring fire safety of objects during the design, construction and operation of buildings and structures;
- to develop a mathematical model and a calculation-experimental method for evaluating the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete structures;
- check the reliability of the developed mathematical model and calculation-experimental method for assessing the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete structures;

- to develop a methodological base for evaluating and forecasting the fire resistance of buildings made of fire-resistant building structures by building models of the thermal and stress-strain state of the building from such structures;

- to develop recommendations for the implementation of the developed calculation-experimental method for evaluating the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete building structures;

- to calculate the economic effect of the implementation of the developed computational and experimental method for evaluating the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete building structures.

To solve the tasks, the following methods were used: comprehensive analysis of previously obtained results regarding the issues of evaluation and ensuring fire resistance of fire-resistant reinforced concrete and steel load-bearing building structures; scientific generalization and systematization, analysis of the requirements of regulatory documents, methods of experimental research on the behavior of samples during heating, numerical methods of finite elements, finite differences, as well as the stress-strain state in elements of building structures under heating conditions during a fire in numerical implementation using the finite element method; experimental methods of researching building structures under various influences, which are based on advanced methods of researching structures during tests with the involvement of modern devices and equipment; mathematical and computer modeling of the processes of non-stationary heat exchange between the fire torch and building structures by using the method of non-stationary thermal conductivity; solving direct and inverse heat conduction problems; the "perturbation" method using a random number generator; methods of mathematical modeling of operational processes, which allow simulating various influences to which real structures may be subjected; for processing experimental data and verifying the results of theoretical studies, methods of mathematical statistics and the method of experiment planning were applied.

The **introduction** substantiates the choice of the research topic, formulates the purpose and tasks of the research, the scientific novelty and practical significance of the work, and presents its general characteristics.

In the **first** section, an analysis of the current state of ensuring fire resistance of reinforced concrete building structures, fire safety requirements for building structures, emergency situations and fires that are associated with loss of fire resistance, as well as modern approaches to ensuring fire resistance are analyzed. The analysis of experimental and calculation methods for evaluating the fire resistance of unprotected and fire-protected reinforced concrete building structures was carried out. Their advantages and disadvantages are determined. The conducted analysis makes it possible to state the trend of spreading the use of the calculation-experimental method for evaluating the limits of fire resistance of reinforced concrete building structures and the fire-resistant ability of coatings for such structures. The need for the development of computational and experimental methods for evaluating the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete building structures has been identified. The analysis showed the presence of contradictions that arise in the process of analyzing the conditions for ensuring fire resistance of fire-protected building structures. The resolution of these contradictions creates conditions for the safe operation of buildings and structures using fire-resistant reinforced concrete structures with scientifically based parameters of their fire-resistant coatings. On the basis of the analysis, it was established that ensuring the standardized value of the limit of fire resistance of load-bearing elements of reinforced concrete building structures is an important and rather complex problem, the solution of which will allow at the stage of design, construction and operation of buildings and structures of industrial and civil construction objects to use construction methods in modern construction constructions that are able to provide buildings or structures with stability at high temperature and force impact or in the event of destruction due to a violation of the normal cycle of the object's functioning.

In the **second** section of the chapter, a mathematical model for evaluating the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete structures is developed. At the

same time, an algorithm was applied, which includes the following stages: selection of the formalization apparatus, construction of the external description, verification of the model's operability, construction of the internal state, verification of operability, and identification of parameters. The initial and boundary conditions for the construction of the specified models are formulated, which make it possible to predict the fire resistance of the fire-resistant reinforced concrete structure with sufficient accuracy for engineering calculations. A special feature of the developed models is taking into account the thermophysical characteristics of reinforced concrete structures and fire-resistant coatings, the peculiarities of the formation of fire regimes, the strength and deformation properties of materials under the influence of fire, nonlinear laws of deformation of structural materials. For the first time, the regularities of the influence of humidity, temperature and solid impurities in the air on the value of the heat exchange coefficient between the heating surface and the ambient air were revealed using the method of planning a multifactorial experiment.

Based on the proposed mathematical model, a calculation-experimental method for evaluating the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete structures has been developed. The structural and logical scheme of the implementation of the developed method involves 9 blocks located on 5 levels, connected by logical connections and includes experimental and calculation parts. The experimental part of the method involves conducting a series of tests on fire resistance under given fire modes (standard, external, hydrocarbon, tunnel, real fire). The calculation part contains the following mandatory procedures: construction of the calculation model of the physical process; identification according to fire resistance test data of thermophysical characteristics of the model based on the solution of inverse heat conduction problems; determination of the characteristics of the fire-resistant ability of coatings based on the results of fire resistance tests of fire-resistant reinforced concrete structures under various test conditions (fire temperature regimes, fixing conditions, load of samples, temperature measurement scheme, climatic factors), calculation of the stress-strain state of the structure.

In the **third** section, the reliability of the developed mathematical model and the calculation-experimental method of evaluating the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete structures was checked using the method of computational experiment, with the help of which the permissible errors were determined. It was established that random errors of 10% when measuring temperatures from the unheated surface of a fire-resistant floor significantly affect the accuracy of determining the thermophysical characteristics of the coating (maximum error up to 30%). To analyze the sensitivity of the proposed model, a technique was used, which consists in sequentially perturbing the model parameters, identifying the thermophysical characteristics of fire-resistant coatings, and solving a series of direct thermal conductivity problems to obtain the values of the root mean square deviation of the temperature over time and directly calculate the sensitivity coefficients. As a result, it was established that the greatest influence on the accuracy of fire resistance assessment of fire-resistant reinforced concrete structures has such parameters of the mathematical model as the coefficient of thermal conductivity of the fire-resistant coating and the specific volumetric heat capacity of the concrete of the reinforced concrete floor. The influence of the heat transfer coefficient between the unheated surface of the floor and the surrounding environment during the evaluation of the fire resistance of fire-resistant multi-hollow reinforced concrete floors on the accuracy of determining the thermophysical characteristics of the fire-resistant coating was revealed. The effect of the temperature regime of the fire on the characteristics of the fire-resistant ability of fire-resistant coatings to ensure the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete structures was studied. At the same time, it was established that the difference between the values of the minimum required thickness of the fire-resistant coating for the standard temperature regime and the temperature regime of a hydrocarbon fire is about 12%, and the difference between the values of the required thickness of the fire-resistant coating for the standard temperature regime and the temperature regime of a tunnel fire according to the standards of the Netherlands (RWS) - 29%

In the **fourth** section, finite-element models for thermotechnical and static calculations of fire-resistant reinforced concrete structures (on the example of a multi-cavity floor and columns) are developed in the ANSYS and LIRA-SAPR software complex. With the help of the developed models, simulation of non-stationary heating and calculation of the stress-strain state of the specified structures was carried out. A comparison of the results of numerical modeling with the results of an experimental study of fire resistance was carried out. An approach is proposed that allows taking into account all types of heat exchange and load by specifying cavities as a solid body with an equivalent coefficient of thermal conductivity in multi-cavity ceilings. The models make it possible to study stationary and non-stationary heating of both unprotected and fire-protected reinforced concrete structures. When determining the reliability of the developed method, a comparison was made of the results of numerical simulation of the heating of fire-resistant reinforced concrete building structures with the results of their experimental study of fire resistance.

In the **fifth** section, computer models of the thermal and stress-strain state of the building of a three-story parking lot for cars, which consists of fire-resistant structures, are developed, taking into account: thermophysical characteristics of fire-resistant coatings, thermophysical and mechanical properties of the materials that make up the structure, nonlinear laws of deformation model materials, mechanical properties of materials at high temperature and force. The model allows you to assess the level of fire safety of the object in terms of ensuring fire resistance and to make effective decisions on increasing the fire resistance of structures. Variants of the occurrence of fires in the parking lot were analyzed to study the fire resistance (stability) of the building. Modeling of non-stationary heating of a reinforced concrete parking column with a square cross-section, dimensions $0.5 \times 0.5 \times 3$ m under the conditions of exposure to a standard fire for 150 minutes was carried out. It has been established that approaches to increase the area of reinforcement take place in the design of buildings and structures, but are generally not acceptable in the operation of already constructed buildings and in the case of the need to increase the

fire resistance limits of reinforced concrete structures to standardized values. Measures to increase the fire resistance limits of structures, consisting in the use of fire-resistant coatings with scientifically based parameters, are proposed.

In the **sixth** section, the economic efficiency of the method of evaluating the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete structures is determined. The technical and economic substantiation of the use of fire-resistant reinforced concrete structures with scientifically proven thicknesses of fire-resistant coatings was carried out. Calculations of the economic effect of the implementation of the developed method of evaluating the fire resistance of fire-resistant structures using the example of a parking lot for cars were carried out. It was established that the costs of using the approach to increase the fire resistance of reinforced concrete columns by applying fire-resistant coatings are 5 times lower than the costs of using additional reinforcement to increase the fire resistance limit of a reinforced concrete column from 150 to 180 minutes (21% savings).

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

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Монографії:

1. Sadkovyi, V., Andronov, V., Semkiv, O., **Kovalov, A.**, Rybka, E., Otrosh, Yu. et. al. Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER. 2021. 180 p. <http://doi.org/10.15587/978-617-7319-43-5>. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем проведено аналіз сучасного стану забезпечення вогнестійкості та стану питання щодо оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій, розроблено розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій, проведено перевірку достовірності розробленого методу.

Статті у періодичних виданнях України, включених до категорії «А»

Переліку наукових фахових видань України:

2. **Kovalov, A.**, Purdenko, R., Otrosh, Y., Tomenko, V., Rashkevich, N., Shcholokov, E., Pidhornyy, M., Zolotova, N., Suprun, O. (2022). Assessment of fire resistance of fireproof reinforced concrete structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (119)), 53–61. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266219> (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем розроблено скінчено-елементну модель вогнезахисного багатопустотного залізобетонного перекриття в програмному середовищі «ЛІРА-САПР», проведено моделювання нестационарного прогріву вогнезахисного багатопустотного залізобетонного перекриття в умовах його випробування при стандартному температурному режимі пожежі, проведено оцінку точності розробленої моделі оцінювання

вогнестійкості вогнезахисного багатопустотного залізобетонного перекриття.

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

Особисто здобувачем досліджено вплив кліматичних факторів на властивості реактивного вогнезахисного покриття та зроблено висновок, що вогнезахисна здатність покриття не змінюється протягом 3 років експлуатації.

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

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

Особисто здобувачем розроблено методику оцінювання вогнестійкості залізобетонних колон, в частині визначення питомої теплоємності та коефіцієнту теплопровідності зразків бетону, які зазнали впливу кліматичних чинників.

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

Особисто здобувачем проведено апробацію методики дослідження впливу кліматичних факторів на вогнезахисну здатність реактивних

вогнезахисних покриттів.

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

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

Особисто здобувачем досліджено вплив випадкових похибок у вимірюванні температур на точність визначення теплофізичних характеристик покриття.

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

Особисто здобувачем розроблено та апробовано методику визначення вогнезахисної здатності покриттів після їх випробувань за методикою пришивидшеного старіння у кліматичній камері, яка враховує можливість втрати вогнезахисної здатності покриття після впливу на нього кліматичних факторів.

9. **Ковальов А.І.,** Отрош Ю.А., Данілін О.М. Експериментальні дослідження вогнестійкості залізобетонних перекриттів з системою вогнезахисту. *Проблемы пожарной безопасности*. Х.: НУГЗУ. 2019. Вып. 45. С. 73–78. (Видання включено до міжнародних наукометричних баз Ulrich's

Periodicals Directory, Academic Research Index – ResearchBib, Google Scholar).

Особисто здобувачем проведено оцінювання ефективності вогнезахисного покриття з мінеральної вати на основі базальту та клею для підвищення вогнестійкості залізобетонних перекриттів.

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

Особисто здобувачем проведено моделювання нестационарного прогріву вогнезахисної пластини в програмному комплексі «ANSYS» з найбільш значущими параметрами.

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

Особисто здобувачем проведено оцінювання вогнезахисної здатності реактивних покриттів, виконано порівняння результатів моделювання з експериментальними даними.

12. **Ковальов А.І.**, Отрош Ю.А., Коссе А.Г., Черненко О.М. Залежність точності визначення теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів від параметрів моделі. *Проблеми пожежної безпеки*. Х.: НУЦЗУ. 2020. № 48. С.63–70. (Видання включено до міжнародних наукометричних баз Ulrich's Periodicals Directory, Academic Research Index – ResearchBib, Google Scholar).

Особисто здобувачем проведено аналіз чутливості температури в точках вимірювання температури до параметрів моделі теплового стану залізобетонного перекриття.

13. **Ковальов А.І.**, Отрош Ю.А., Томенко В.І., Пирогов О.В., Морковська

Н.Г. Розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Х.: НУЦЗУ. 2021. № 34. С.77–93. (Видання включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Research Bib, OpenAIRE, ZENODO, Google Scholar).

Особисто здобувачем взято участь в розробці розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених будівельних конструкцій.

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

Особисто здобувачем проведено перевірку адекватності розробленого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості.

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

Особисто здобувачем розроблено комп'ютерну та скінченно-елементну моделі оцінювання вогнестійкості вогнезахищених конструкцій та проведено оцінювання вогнестійкості вогнезахищених колон без прикладеного до них навантаження за допомогою розрахунково-експериментального методу.

16. **Ковальов А.І.**, Отрош Ю.А., Томенко В.І., Васильєв О.Б. Оцінювання вогнезахисної здатності новостворених вогнезахисних покриттів сталевих конструкцій. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*.

Одеса: ОДАБА. 2021. № 85. С. 79–88 (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

Особисто здобувачем проведено оцінювання вогнезахисної здатності розроблених вогнезахисних композицій розрахунково-експериментальним методом.

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

Особисто здобувачем розроблено модель вогнезахищеного багатопустотного залізобетонного перекриття в програмному комплексі «ANSYS» та проведено моделювання нестационарного прогріву.

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

Особисто здобувачем розроблено структурно-логічну схему забезпечення вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій, математичну модель оцінювання вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій, комп'ютерну модель напружено-деформованого стану вогнезахисеного багатопустотного залізобетонного перекриття в програмному комплексі «ЛІРА-САПР».

19. **Ковальов А.І.**, Пурденко Р.Р., Отрош Ю.А., Томенко В.І., Качкар Є.В., Майборода Р.І. Оцінювання вогнестійкості вогнезахисених сталевих балок. *Вісті Донецького гірничого інституту*. Донецьк: ДВНЗ «ДНТУ». 2022. № 2 (51). С.43-53. (Видання включено до міжнародних наукометричних баз

Index Copernicus, Research Bib, [Citefactor](#), [International Society for Research Activity \(ISRA\) Journal Impact Factor \(JIF\)](#), International Accreditation and Research Council (IARC), [Root Society for Indexing and Impact Factor Service \(Rootindexing\)](#), General Impact Factor (GIF)).

Особисто здобувачем розроблено комп'ютерну модель для розрахунку меж вогнестійкості вогнезахисних конструкцій (на прикладі сталеві балки із вогнезахистом), проведено моделювання теплового стану балки, проведено оцінку точності розробленої моделі та порівняння результатів експерименту з розрахунковими даними.

20. **Ковальов А.І.**, Пурденко Р.Р., Отрош Ю.А., Томенко В.І., Рашкевич Н.В., Юрченко С.П. Моделювання нестационарного прогріву вогнезахисних залізобетонних колон. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. Київ: ІДУтаНДЦЗ. 2022. № 2(14). С.89-100. (Видання включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Google Scholar).

Особисто здобувачем розроблена комп'ютерна модель вогнезахисної залізобетонної колони в програмному середовищі «ЛІРА-САПР» для моделювання нестационарного прогріву в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі, перевірено точність розробленої моделі..

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

Особисто здобувачем розроблено скінчено-елементну модель вогнезахисної реактивним вогнезахисним покриттям колони в програмному комплексі «ЛІРА-САПР», проведено моделювання нестационарного прогріву вогнезахисної колони, проведено перевірку працездатності розробленої скінчено-елементної моделі вогнезахисної колони.

22 Отрош Ю.А., **Ковальов А.І.**, Рашкевич Н.В., Тараненко І.С. Оцінювання вогнестійкості будівлі із вогнезахисних залізобетонних

будівельних конструкцій. *Комунальне господарство міст, серія: технічні науки та архітектура*. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. 2023. № 3(177). С.134–141. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

Особисто здобувачем розроблено методологічну базу для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій шляхом побудови моделі теплового та напружено-деформованого стану будівлі паркінга.

Статті у наукових фахових виданнях України:

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

Особисто здобувачем досліджено вплив помилок у вимірюванні температур на похибку визначення параметрів штукатурного вогнезахисного покриття для захисту залізобетонних багатопустотних перекриттів.

24. **Ковалев А.И.**, Круковский П.Г., Качкар Е.В. Определение характеристик вспучивающегося огнезащитного покрытия «Феникс СТВ» по данным испытаний на огнестойкость монолитного перекрытия. *Пожарная безопасность: теория и практика*. 2012. № 11. С. 43–51.

Особисто здобувачем досліджено вогнестійкість монолітних залізобетонних перекриттів розрахунково-експериментальним методом.

25. **Ковалев А.И.** Влияние погрешностей в измерении температур на точность определения теплофизических характеристик покрытий монолитных железобетонных перекрытий. *Пожарная безопасность: теория и практика*. 2012. № 12. С. 41–45.

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

Особисто здобувачем досліджено особливості процесів теплообміну в

порожнинах багатопустотних залізобетонних перекриттів за допомогою двовимірної (в програмному середовищі ANSYS FLUENT) та одновимірної (в програмному середовищі FRIEND) моделей.

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

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

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

Особисто здобувачем визначено завдання дослідження, визначено перелік основних проблем і труднощів при визначенні вогнезахисної здатності покриттів при різних температурних режимах пожежі.

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

Особисто здобувачем проведено вогневі випробування вогнезахисних пластин при температурному режимові вуглеводневої пожежі. На основі отриманих даних, визначено теплофізичні характеристики утвореного покриття, що залежать від температури, та характеристику вогнезахисної здатності покриття, що досліджувалось.

31. **Ковальов А.І.,** Зобенко Н.В. Методика попередньої оцінки вогнезахисної здатності покриттів для сталевих конструкцій в умовах температурного режиму вуглеводневої пожежі. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2016. № 1. С. 59–65.

Особисто здобувачем розроблено методику попередньої оцінки вогнезахисної здатності покриттів в умовах вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі та проведено апробацію зазначеної методики при оцінці вогнезахисної здатності реактивного вогнезахисного покриття.

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

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

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

Особисто здобувачем виокремлено перелік проблем, що мають місце при визначенні вогнезахисної здатності покриттів після їх кліматичних випробувань, сформульовану мету подальших досліджень та завдання, що необхідно буде розв'язати.

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

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

Особисто здобувачем сформульовано мету дослідження, проведено вогневі випробування масштабованих вогнезахисених зразків, визначено

теплофізичні характеристики та характеристику вогнезахисної здатності досліджуваного покриття.

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

Особисто здобувачем визначено вплив кількості і розміщення термопар з необігрівної поверхні вогнезахисної пластини на точність визначення теплофізичних і вогнезахисних характеристик цього покриття.

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

37. **Kovalov A.**, Otrosh Y., Ostroverkh O., Hrushovinchuk O., Savchenko O. Fire resistance evaluation of reinforced concrete floors with fire-retardant coating by calculation and experimental method. *E3S Web of Conferences*. 2018. 60. 00003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000003>. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем проведено оцінювання вогнестійкості багатопустотного залізобетонного перекриття з вогнезахисним штукатурним покриттям розрахунково-експериментальним методом та визначено теплофізичні характеристики і характеристику вогнезахисної здатності досліджуваного покриття.

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

Особисто здобувачем досліджено вплив вогнезахисного покриття на вогнестійкість.

39. **Kovalov A.**, Konoval V., Khmyrova A., Dudko K. Parameters for simulation of the thermal state and fire-resistant quality of hollow-core floors used in the mining industry. *E3S Web of Conferences*. 2019. 123. 01022. https://doi.org/10.1051/e3sconf/2019123010_22. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Особисто здобувачем проведено дослідження теплового стану і вогнестійкості залізобетонного перекриття та розрахункове визначення межі вогнестійкості конструкції на основі двовимірної моделі теплопровідності.

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

Особисто здобувачем проведено аналіз випробувань на вогнестійкість залізобетонного перекриття з вогнезахисним покриттям, зроблено висновок про ефективність такого покриття і про межі застосування таких покриттів.

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

Особисто здобувачем досліджено вплив температурних режимів пожежі на вогнезахисну здатність пасивних покриттів залізобетонних перекриттів.

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

Особисто здобувачем проведено експериментальне визначення температури з необігрівної поверхні масштабованих вогнезахисених зразків в умовах вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі та порівняння результатів з результатами чисельного моделювання.

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

Особисто здобувачем розроблена та перевірена достовірність моделі для оцінювання вогнестійкості вогнезахисеної багатопустотної плити перекриття.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

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

Особисто здобувачем виокремлено перелік проблем при визначенні вогнезахисної здатності покриттів в умовах впливу вуглеводневої пожежі.

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

Особисто здобувачем досліджено вплив температурного режиму вуглеводневої пожежі на межу вогнестійкості.

46. **Ковальов А.І.**, Зобенко Н.В. Забезпечення вогнестійкості металевих

конструкцій в умовах впливу підвищених температур пожежі // Матеріали 17-ї Всеукраїнської наук.-практ. конф. рятувальників, 22–23 вересня 2015 року, К.: ІДУЦЗ, 2015. С. 188–189. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем досліджено вплив температурного режиму вуглеводневої пожежі на межу вогнестійкості.

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

Особисто здобувачем поставлено завдання дослідження строку придатності вогнезахисних покриттів.

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

Особисто здобувачем досліджено особливості впливу температурного режиму вуглеводневої пожежі.

49. **Ковальов А.І.**, Зобенко Н.В., Ведула С.А. Визначення характеристики вогнезахисної здатності покриттів металевих конструкцій при їх випробуванні в умовах температурного режиму вуглеводневої пожежі // Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції, 20–21 жовтня 2016 року, Львів: ЛДУБЖД, 2016. С. 174. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем визначено залежність товщини вогнезахисної пластини від мінімальної товщини утвореного вогнезахисного покриття для часу вогневої дії за температурним режимом вуглеводневої пожежі.

50. Нуянзін В.М., **Ковальов А.І.**, Ведула С.А., Нестеренко А.А., Жаврук

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

Особисто здобувачем досліджено вплив кліматичних факторів на властивості вогнезахисних покриттів.

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

Особисто здобувачем досліджено вплив кількості і місць розташування термопар на точність визначення параметрів вогнезахисних покриттів.

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

Особисто здобувачем визначено залежність товщини вогнезахисної пластини від мінімальної товщини утвореного вогнезахисного покриття для часу вогневої дії за температурним режимом вуглеводневої пожежі.

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

Особисто здобувачем визначено параметри (теплофізичні характеристики і характеристика вогнезахисної здатності) реактивного вогнезахисного покриття. Показано вплив кліматичних факторів на теплофізичні характеристики покриття і на його вогнезахисну здатність.

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

Особисто здобувачем розроблено методику оцінювання вогнезахисної здатності покриттів після впливу кліматичних факторів.

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

Особисто здобувачем проведені вогневі випробування зразків зменшених розмірів з нанесеною вогнезахисною речовиною при тепловій дії на дослідний зразок стандартного температурного режиму пожежі.

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

Особисто здобувачем розроблена чисельна модель нестационарного прогріву системи «вогнезахисна пластина – вогнезахисне покриття».

57. **Ковальов А.І.**, Поклонський В.Г., Отрош Ю.А., Майборода Р.І., Щолоков Е.Е. Розробка моделі для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій // Актуальні проблеми інженерної механіки: матеріали ІХ Міжнародної конференції, 17–20 травня 2022 року,

Одеса: ОДАБА, 2022. С. 101-103. (Форма участі – заочна).

Особисто здобувачем розроблено модель для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій.

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

Особисто здобувачем запропоновано вирішення проблеми забезпечення вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних колон.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

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

Патенти

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

Особисто здобувачем розроблений пристрій для визначення адгезійної міцності вогнезахисного покриття.

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

Особисто здобувачем взято участь в розробці способу визначення температури втрати несучої здатності будівельної конструкції.

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

Особисто здобувачем взято участь в розробці способу визначення межі вогнестійкості будівельної конструкції.

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

Особисто здобувачем взято участь в розробці способу визначення фактичної межі вогнестійкості будівельних конструкцій експлуатованих будівель та споруд.

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

Особисто здобувачем взято участь у розробці способу малоруїнівного визначення температури втрати фактичної несучої здатності будівельної конструкції експлуатованих будівель та споруд.

65. Спосіб визначення несучої здатності вібронавантаженої будівельної конструкції / Отрош Ю.А., Рибка Є.О., Пономаренко Р.В., Ромін А.В.,

Максимова М.О., Миргород О.В., **Ковальов А.І.**, Черненко О.М. Пат. 149253 України, МПК G01N 3/24 (2006.01), заявник та патентовласник Національний університет цивільного захисту України. № и 2021 03378, заявка 15.06.2021, опуб. 27.10.2021, Бюл. № 43.

Особисто здобувачем взято участь у розробці способу визначення несучої здатності вібронавантаженої будівельної конструкції.

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

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ЗМІСТ.....	35
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА СИМВОЛІВ.....	40
ВСТУП	41
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ	
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА МЕТОДІВ	
ОЦІНЮВАННЯ	
	57
1.1 Вогнестійкість будівельних конструкцій як умова безпечної експлуатації будівель та споруд	63
1.2 Вимоги пожежної безпеки до будівельних конструкцій, які використовуються в сучасному будівництві	68
1.3 Аналіз статистичних даних	72
1.3.1 Статистика пожеж	72
1.3.2 Аналіз надзвичайних ситуацій та пожеж, пов'язаних з втратою вогнестійкості	73
1.4 Сучасні підходи забезпечення вогнестійкості	77
1.4.1 Вогнезахист залізобетонних конструкцій	80
1.5 Методи оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій	86
1.5.1 Експериментальні методи	86
1.5.2 Розрахункові методи	90
1.5.3 Розрахунково-експериментальні методи	95
1.6 Випробувальне обладнання для дослідження вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій	99
1.7 Аналіз умов проведення досліджень залізобетонних будівельних конструкцій на вогнестійкість	102
1.7.1 Розрахункові температурні сценарії дослідження залізобетонних будівельних конструкцій на вогнестійкість	102
1.7.2 Вплив кліматичних факторів на вогнезахисну здатність покриттів вогнезахисених будівельних конструкцій	111

1.8 Системний аналіз процесу забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій	118
Висновки до розділу 1	121

РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

2.1 Розробка моделі фізичних процесів та математичної моделі вогнестійкості вогнезахисної залізобетонної конструкції	125
2.1.1 Алгоритм розробки математичної моделі	126
2.1.2 Початкові та граничні умови математичної моделі	127
2.1.3 Рівняння регресії для визначення коефіцієнту тепловіддачі між обігрівною поверхнею та повітрям навколишнього середовища	134
2.2 Структурно-логічна схема розрахунково-експериментального методу ...	154
2.3 Перевірка працездатності запропонованого розрахунково-експериментального методу	158
2.4 Процедура реалізації розрахунково-експериментального методу на масштабованих зразках.....	167
2.4.1 Визначення впливу кліматичних факторів та температурного режиму пожежі	167
2.4.2 Визначення впливу температурних режимів пожежі (на прикладі температурного режиму вуглеводневої пожежі)	177
Висновки до розділу 2	189

РОЗДІЛ 3 ПЕРЕВІРКА ДОСТОВІРНОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА РОЗРАХУНКОВО- ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МЕТОДУ.....

3.1 Результати аналізу чутливості параметрів математичної моделі на вихідний результат.....	192
3.2 Результати аналізу похибок у вимірюванні температури на точність визначення параметрів покриття.....	195
3.3 Визначення впливу температурних режимів пожежі на точність методу..	201

Висновки до розділу 3	206
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА МЕТОДОЛОГІЧНОЇ БАЗИ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ	207
4.1 Апаратно-програмний комплекс оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій	207
4.2 Апробація розробленого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій.....	209
4.2.1 Оцінювання вогнестійкості вогнезахищеного залізобетонного перекриття.....	209
4.2.2 Оцінювання вогнестійкості вогнезахищеної залізобетонної колони	234
4.3 Апробація розробленого розрахунково-експериментального методу при оцінюванні вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій.....	242
Висновки до розділу 4	258
РОЗДІЛ 5 ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНОГО РОЗРАХУНКОВО- ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	260
5.1 Процедура реалізації розробленого розрахунково-експериментального методу при оцінюванні вогнестійкості конструктивної системи будівлі .	260
5.2 Побудова скінчено-елементної моделі конструктивної системи будівлі...	261
5.3 Дослідження вогнестійкості будівельних конструкцій конструктивної системи будівлі (колон).....	263
5.4 Заходи з підвищення меж вогнестійкості будівельних конструкцій конструктивної системи будівлі.....	268
5.5 Оцінювання вогнестійкості конструктивної системи будівлі в цілому за допомогою розробленої моделі.....	274
Висновки до розділу 5	278

РОЗДІЛ 6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	279
6.1 Визначення економічної ефективності застосування методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій.....	279
6.2 Техніко-економічне обґрунтування застосування вогнезахисних покриттів залізобетонних конструкцій з науково обґрунтованими значеннями товщини.....	282
6.3 Розрахунок економічного ефекту від впровадження розроблених методів оцінювання вогнестійкості вогнезахисних конструкцій.....	285
Висновки до розділу 6	287
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	288
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	293
ДОДАТКИ	325
ДОДАТОК А. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	326
ДОДАТОК Б. Документи про впровадження	340
ДОДАТОК В. Документи про впровадження	342
ДОДАТОК Г. Документи про впровадження	344
ДОДАТОК І. Документи про впровадження	347
ДОДАТОК Д. Документи про впровадження	350
ДОДАТОК Е. Документи про впровадження	352
ДОДАТОК Є. Документи про впровадження	355
ДОДАТОК Ж. Листи підтримки результатів дисертаційної роботи	357
ДОДАТОК З. Ліцензія ЛІРА-САПР	361
ДОДАТОК И. Локальний кошторис, розроблений в комплексі АВК-5 на будівельні роботи щодо підвищення вогнестійкості залізобетонних колон за допомогою додаткового армування	363

ДОДАТОК І. Локальний кошторис, розроблений в комплексі АВК-5 на будівельні роботи щодо підвищення вогнестійкості залізобетонних колон за допомогою використанням вогнезахисних покриттів365

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА СИМВОЛІВ

ГУ – граничні умови

ОЗТ – обернена задача теплопровідності

ПЗТ – пряма задача теплопровідності

РЕМ – розрахунково-експериментальний метод

ТФХ – теплофізичні характеристики

ТХА – термопара хромель-алюмелева

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·°С)

C_v – питома об'ємна теплоємність, Дж/(м³·°С)

α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·°С)

θ – температура, °С

t – час вогневого впливу при заданому режиму пожежі, с

δ – товщина вогнезахисного покриття, мм

a – відстань від найближчої обігріваної поверхні залізобетонної конструкції до осі арматури, мм

E_c – модуль пружності бетону, МПа

α_{ct} – коефіцієнт лінійної температурної деформації бетону та сталі, °С⁻¹

ε_{cu1} – гранична відносна деформація бетону

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. В умовах глобалізації та збільшення загроз для людини перше місце відіграє саме збереження стійкості будівель та споруд в умовах пожеж, а також збереження їх функціонального призначення після таких впливів. Згідно з статистичними даними за останні десять років встановлено, що кожного року в середньому виникало 80 тисяч пожеж, при цьому кількість пожеж в будівлях та спорудах різного функціонального призначення складала 30 тис. (40 % від загальної кількості). А кількість зруйнованих чи пошкоджених будівель і споруд становила близько 25 тисяч (83 % від кількості пожеж в будівлях). Кожен рік в середньому унаслідок пожеж гинуло 1800 та травмувалося 1500 людей. Така негативна статистика вказує на те, що одним з факторів, на якому ґрунтується пожежна безпека під час проєктування, будівництва та експлуатації будівель та споруд різного функціонального призначення є забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій. Вимоги стійкості будівель та споруд забезпечуються комплексом заходів, що передбачаються як технологією виконання будівельних конструкцій, так і застосуванням вогнезахисних покриттів. Одним із шляхів підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій є застосування ефективних вогнезахисних покриттів із обґрунтованими параметрами для забезпечення необхідного рівня вогнестійкості, що сприятиме підвищенню пожежної безпеки будівель та споруд.

Дослідженнями щодо експериментального та розрахункового оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій шляхом застосування вогнезахисних покриттів займалися такі вчені: А.С. Беліков, М.М. Гивлюд, О.І. Голоднов, В.М. Жартовський, С.В. Жартовський, О.О. Кіреєв, П.Г. Круковський, С.В. Поздєєв, В.М. Ройтман, М.М. Семерак, М.Г. Сур'янінов, С.Л. Фомін, Т.М. Шналь, Çirpici, В. К., Lucherini, A., De Silva D., Imran, M., J. Jiang, Li G.-Q., O. Pettersson, Q. Xu, L.J. Segerlind, Y.C. Wang. При цьому поза увагою залишилися питання обґрунтування найбільш значущих чинників впливу вогнезахисних властивостей покриттів як підґрунтя для

розвитку наукових основ підвищення рівня забезпечення пожежної безпеки об'єктів (в частині забезпечення достатнього рівня вогнестійкості конструкцій) шляхом застосування вогнезахисних покриттів з обґрунтованими параметрами та умовами експлуатації при проектуванні та будівництві нових об'єктів.

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

Отже, стан порушеного питання характеризується *протиріччями*:

на практиці:

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

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

- в теорії:

а) з одного боку, наявне підґрунтя щодо розкриття впливу різних чинників на забезпечення вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних

будівельних конструкцій об'єктів під час проєктування, будівництва та експлуатації будівель і споруд;

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

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

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

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано відповідно до Державної цільової соціальної програми забезпечення пожежної безпеки на 2011–2015 роки (розпорядження Кабінету Міністрів України від 29.12.2010 №2348-р), а також у рамках науково-дослідних робіт, що виконувалися в Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України: «Розрахунково-експериментальний метод визначення характеристик вогнестійкості будівельних конструкцій, обладнання і вогнезахисних покриттів» (ДР № 0113U001473 від 15.02.2013), в якій здобувач був виконавцем (термін виконання 2013–2014 роки),

«Визначення довговічності вогнезахисних покриттів металевих конструкцій, що спучуються» (ДР № 0115U000978), в якій здобувач був відповідальним виконавцем (термін виконання 2015–2016 роки), науково-дослідної роботи, що виконувалася в Національному університеті цивільного захисту України: «Прогнозування залишкового ресурсу будівельних конструкцій після силових, деформаційних і високотемпературних впливів» (ДР № 0119U001003), в якій здобувач був виконавцем (термін виконання 2019–2023 роки).

Ідея роботи полягає у створенні передумов зниження впливу небезпечних чинників пожежі, таких як обвалення будівель та споруд, внаслідок втрати вогнестійкості будівельних конструкцій шляхом застосування під час проєктування, будівництва та експлуатації вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій з обґрунтованими параметрами та умовами експлуатації вогнезахисних покриттів.

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

Для досягнення поставленої мети потребували вирішення наступні наукові завдання:

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

- розробити математичну модель та розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій;
- перевірити достовірність розроблених математичної моделі та розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій;
- розробити методологічну базу для оцінювання та прогнозування вогнестійкості будівель із вогнезахисних будівельних конструкцій шляхом побудови моделей теплового та напружено-деформованого стану будівлі з таких конструкцій;
- розробити рекомендації щодо впровадження розробленого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій;
- розрахувати економічний ефект від впровадження розробленого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій.

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

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

Методи досліджень. Комплексний аналіз раніше отриманих результатів щодо питань оцінювання та забезпечення вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних несучих будівельних конструкцій; наукове узагальнення та систематизація, аналіз вимог нормативних документів, методи експериментального дослідження поведінки зразків при нагріванні, числові методи скінчених елементів, скінчених різниць, а також напружено-

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

Наукова новизна отриманих результатів.

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

1. Розроблено математичну модель для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій, яка дозволяє враховувати теплофізичні характеристики залізобетонних конструкцій та вогнезахисних покриттів, особливості режимів пожежі, механічні властивості матеріалів за високих температур, нелінійність законів деформування матеріалів конструкції та оцінювати вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій у

граничних станах за ознакою втрати несучої та/або теплоізолювальної здатності.

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

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

удосконалено:

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

набули подальшого розвитку:

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

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

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

– ДСТУ-Н Б В.1.2-17:2016 «Настанова щодо науково-технічного моніторингу будівель і споруд»;

– ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 «Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість» (акт впровадження ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» від 08.04.2019 р. № 100-582).

Розроблені методи апробовані та впроваджені у діяльність ТОВ «ЛІРА САПР» для розрахункового оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій (довідка про впровадження № 49 від 07.03.2023 р.), ГУ ДСНС України в Одеській області (акт впровадження від 19.01.2023 р.) під час оцінювання вогнестійкості вогнезахищених конструкцій на складі продукції ТОВ «Дельта-Вільмар Україна» (м. Южне) та зливо-наливній естакаді ПАТ «Одеснафтопродукт» (м. Одеса), в процесі надання послуг у сфері будівництва ТОВ «ПВК «Спецзахист» (акт впровадження від 10.01.2023р.), для розрахунку меж вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій Запорізької,

Рівненської, Хмельницької та Південноукраїнської атомних електростанцій, під час проєктування будівель та споруд приватним підприємством «ПроектБудСтар» (акт впровадження від 25.11.2022 р.) при будівництві багатоквартирного житлового будинку по вул. Сумгайтській, 15, в місті Черкасах (розрахунок залізобетонних перекриттів та колон на вогнестійкість). Результати роботи використані приватним науково-виробничим підприємством «Прометей-Сервіс» (м. Черкаси), приватним підприємством «ПОЖЗАХИСТ-2020» (м. Хмельницький), страховою компанією «Уніка» (м. Київ) в процесі розроблення проєктів проведення робіт з вогнезахисту та оцінювання прийняттого ризику збудованих об'єктів (листи-підтримки).

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

проведення лабораторних та практичних занять з навчальних дисциплін «Металеві конструкції», «Будівельні конструкції (залізобетонні)», «Залізобетонні та армокам'яні конструкції», «Модернізація, реконструкція та ремонтно-відновлювальні роботи в будівництві», «Випробування та обстеження споруд».

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

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

В наукових роботах, що опубліковані у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у наступному. В роботі [1] здобувачем проведено аналіз сучасного стану забезпечення вогнестійкості та стану питання щодо оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій, розроблено розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій, проведено перевірку достовірності розробленого методу. В роботі [2] розроблено скінчено-елементну модель вогнезахищеного багатопустотного залізобетонного перекриття в програмному середовищі «ЛІРА-САПР», проведено моделювання нестационарного прогріву вогнезахищеного багатопустотного залізобетонного

перекриття в умовах його випробування при стандартному температурному режимі пожежі, проведено оцінку точності розробленої моделі оцінювання вогнестійкості вогнезахисного багатопустотного залізобетонного перекриття. В роботі [3] досліджено вплив кліматичних факторів на властивості реактивного вогнезахисного покриття та зроблено висновок, що вогнезахисна здатність покриття не змінюється протягом 3 років експлуатації. В роботі [4] розроблено методику оцінювання вогнестійкості залізобетонних колон в частині визначення питомої теплоємності та коефіцієнту теплопровідності зразків бетону, які зазнали впливу кліматичних чинників. В роботі [5] проведено апробацію методики дослідження впливу кліматичних факторів на вогнезахисну здатність реактивних вогнезахисних покриттів. В роботі [7] досліджено вплив випадкових похибок у вимірюванні температур на точність визначення теплофізичних характеристик покриття. В роботі [8] розроблено та апробовано методику визначення вогнезахисної здатності покриттів після їх випробувань за методикою пришвидшеного старіння у кліматичній камері, яка враховує можливість втрати вогнезахисної здатності покриття після впливу на нього кліматичних факторів. В роботі [9] проведено оцінювання вогнестійкості залізобетонних перекриттів захищених мінеральною ватою. В роботі [10] проведено моделювання нестационарного прогріву вогнезахисної пластини в програмному комплексі «ANSYS» з найбільш значущими параметрами. В роботі [11] проведено оцінювання вогнезахисної здатності реактивних покриттів, виконано порівняння результатів моделювання з експериментальними даними. В роботі [12] проведено аналіз чутливості температури в точках вимірювання температури до параметрів моделі теплового стану залізобетонного перекриття. В роботі [13] взято участь в розробці розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних будівельних конструкцій. В роботі [14] проведено перевірку адекватності розробленого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості. В роботі [15] розроблено комп'ютерну та скінченно-елементну моделі оцінювання вогнестійкості вогнезахисних

конструкцій та проведено оцінювання вогнестійкості вогнезахисених колон без прикладеного до них навантаження за допомогою розрахунково-експериментального методу. В роботі [16] проведено оцінювання вогнезахисної здатності розроблених вогнезахисних композицій розрахунково-експериментальним методом. В роботі [17] розроблено модель вогнезахисеного багатопустотного залізобетонного перекриття в програмному комплексі «ANSYS» та проведено моделювання нестационарного прогріву. В роботі [18] розроблено структурно-логічну схему забезпечення вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій, математичну модель оцінювання вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій, комп'ютерну модель напружено-деформованого стану вогнезахисеного багатопустотного залізобетонного перекриття в програмному комплексі «ЛІРА-САПР». В роботі [19] розроблено комп'ютерну модель для розрахунку меж вогнестійкості вогнезахисених конструкцій (на прикладі сталеві балки із вогнезахистом), проведено моделювання теплового стану балки, проведено оцінку точності розробленої моделі та порівняння результатів експерименту з розрахунковими даними. В роботі [20] розроблена комп'ютерна модель вогнезахисеної залізобетонної колони в програмному середовищі «ЛІРА-САПР» для моделювання нестационарного прогріву в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі, перевірено точність розробленої моделі. В роботі [21] проведено моделювання нестационарного прогріву конструкції, перевірено працездатність розробленої скінченно-елементної моделі. В роботі [22] розроблено методологічну базу для оцінювання вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних будівельних конструкцій шляхом побудови моделі теплового та напружено-деформованого стану будівлі паркінга. В роботі [23] досліджено вплив помилок у вимірюванні температур на похибку визначення параметрів штукатурного вогнезахисного покриття для захисту залізобетонних перекриттів. В роботі [24] досліджено вогнестійкість монолітних залізобетонних перекриттів розрахунково-експериментальним методом. В роботі [26] досліджено особливості процесів теплообміну в

порожнинах багатопустотних залізобетонних перекриттів за допомогою комп'ютерних моделей. В роботі [29] визначено основні проблеми і труднощі при оцінюванні вогнестійкості при різних температурних режимах пожежі. В роботі [30] проведено вогневі випробування вогнезахисних пластин при температурному режимові вуглеводневої пожежі, визначено теплофізичні характеристики та характеристику вогнезахисної здатності утвореного покриття. В роботі [31] розроблено методику попередньої оцінки вогнезахисної здатності покриттів в умовах вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі. В роботі [34] виокремлено перелік проблем, що мають місце при визначенні вогнезахисної здатності покриттів після їх кліматичних випробувань. В роботі [35] проведено вогневі випробування масштабованих вогнезахисних зразків, визначено теплофізичні характеристики та характеристику вогнезахисної здатності досліджуваного покриття. В роботі [36] визначено вплив кількості і розміщення термопар з необігрівної поверхні вогнезахисної пластини на точність визначення вогнезахисних властивостей покриття. В роботі [37] проведено оцінювання вогнестійкості вогнезахисного залізобетонного перекриття розрахунково-експериментальним методом. В роботі [38] досліджено вплив вогнезахисного покриття на вогнестійкість. В роботі [39] проведено дослідження теплового стану і вогнестійкості залізобетонного перекриття та розрахункове визначення межі вогнестійкості. В роботі [40] проведено аналіз випробувань на вогнестійкість вогнезахисного залізобетонного перекриття. В роботі [41] досліджено вплив температурних режимів пожежі на вогнезахисну здатність пасивних покриттів залізобетонних перекриттів. В роботі [42] проведено експериментальне визначення температури з необігрівної поверхні масштабованих вогнезахисних зразків в умовах вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі. В роботі [43] розроблено та перевірено достовірність моделі для оцінювання вогнестійкості вогнезахисної багатопустотної плити перекриття. В роботі [44] виокремлено перелік проблем при визначенні вогнезахисної здатності покриттів в умовах впливу вуглеводневої пожежі. В роботах [45, 46]

досліджено вплив температурного режиму вуглеводневої пожежі. В роботі [47] поставлено завдання дослідження строку придатності вогнезахисних покриттів. В роботі [48] досліджено особливості впливу температурного режиму вуглеводневої пожежі. В роботах [49, 52] поставлені завдання визначення характеристик вогнезахисних покриттів. В роботі [50] досліджено вплив кліматичних факторів на властивості вогнезахисних покриттів. В роботі [51] досліджено вплив кількості і місць розташування термопар на точність визначення параметрів вогнезахисних покриттів. В роботі [53] визначено параметри реактивного вогнезахисного покриття після впливу кліматичних факторів. В роботі [54] розроблено методику оцінювання вогнезахисної здатності покриттів після впливу кліматичних факторів. В роботі [55] проведені вогневі випробування зразків зменшених розмірів з нанесеною вогнезахисною речовиною при тепловій дії на дослідний зразок стандартного температурного режиму пожежі. В роботі [56] розроблена чисельна модель нестационарного прогріву системи «вогнезахисна пластина – вогнезахисне покриття». В роботі [57] розроблено модель для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій. В роботі [58] запропоновано вирішення проблеми забезпечення вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних колон. В роботі [60] розроблено пристрій для визначення адгезійної міцності вогнезахисного покриття. В роботах [61–65] взято участь в розробці способів визначення температури втрати несучої здатності будівельної конструкції, фактичної межі вогнестійкості будівельних конструкцій експлуатованих будівель та споруд, визначення несучої здатності вібронавантаженої будівельної конструкції. В роботі [66] розроблено методику визначення характеристики вогнезахисної здатності покриттів залізобетонних конструкцій.

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати дисертаційного дослідження доповідались, обговорювались та отримали позитивне схвалення на: IV Міжнародній науково-практичній конференції «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2014.); Міжнародній науково-практичній

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

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

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Дисертація містить 325

сторінок друкованого тексту (з них 249 сторінок основної частини дисертації), 113 рисунків, 19 таблиць, 265 найменувань використаних джерел, 12 додатків на 41-ій сторінці.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ

Проаналізований сучасний стан забезпечення вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій, вимоги пожежної безпеки до будівельних конструкцій, проаналізовані надзвичайні ситуації та пожежі, які пов'язані з втратою вогнестійкості, а також сучасні підходи до забезпечення вогнестійкості. Проведено аналіз експериментальних та розрахункових методів оцінювання вогнестійкості незахищених та вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій. Визначено їх переваги та недоліки. Виконаний аналіз дав змогу показати тенденцію використання розрахунково-експериментальних методів оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій та вогнезахисної здатності покриттів таких конструкцій. Визначено необхідність в розробленні розрахунково-експериментальних методів оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій. Результати аналізу показали наявність протиріч в умовах забезпечення вогнестійкості вогнезахищених будівельних конструкцій. Розв'язання цих протиріч створить умови щодо безпечної експлуатації будівель та споруд з використанням вогнезахищених залізобетонних конструкцій з обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів. Встановлено, що забезпечення нормованого значення межі вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій є важливою і досить складною проблемою, розв'язання якої дозволить на стадії проєктування, будівництва та експлуатації будівель і споруд об'єктів будівництва застосовувати будівельні конструкції, які здатні забезпечити будівлям чи спорудам стійкість у разі високотемпературного та силового впливів чи руйнування внаслідок порушення нормального циклу функціонування об'єкта.

Структурно-логічна схема дисертаційного дослідження зображена на рис.

1.1.



Рис. 1.1 Структурно-логічна схема дослідження

Структурно-логічна схема (рис. 1.1) включає в себе аналіз сучасного стану забезпечення вогнестійкості та оцінювання вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій, проведення експериментальних досліджень по визначенню ефективності вогнезахисних покриттів будівельних конструкцій при різних умовах впливу, розробку розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій, апробацію методу та впровадження результатів при розробці нових нормативних документів.

В сучасному світі потреба в безпеці набуває першочергового значення. Розвиток людства призвів до появи нових техногенних та природних загроз [1].

Підвищення інтенсивності та розширення спектру таких загроз вимагає розробки нових методів та підходів як до забезпечення безпеки життєдіяльності людини, так і національної безпеки в цілому [2].

Найбільш чисельними та небезпечними подіями є пожежі. Щорічно в світі виникає близько 8 мільйонів пожеж, на яких гине до 100 тисяч людей. Вказане висуває підвищені вимоги як до готовності рятувальних підрозділів до дій за призначенням, так і до недопущення чи пом'якшення наслідків таких подій шляхом розробки превентивних заходів [3]. Найбільшу цікавість в цьому плані становить досвід США, де ефективні багатопрофільні структури системи протидії загрозам існують вже півстоліття.

Вплив пожеж на людину та навколишнє середовище є комплексним і характеризується дією наступних взаємопов'язаних первинних та вторинних чинників [4].

Зміна кліматичних чинників на планеті призводить до масштабних пожеж, які є надпотужними джерелами забруднення навколишнього середовища та призводять до екологічних катастроф [5]. Нерідко такі пожежі через забруднення атмосферного повітря [6] провокують кислотні опади [7], що в свою чергу призводить до забруднення річок, ґрунтових вод та водоносних горизонтів [8, 9]. В глобальному масштабі пожежі в подальшому посилюють «парниковий ефект».

Наряду з ландшафтними пожежами, особливо небезпечним різновидом загроз є пожежі у радіаційно-забруднених екосистемах [10]. Не виключенням є зона відчуження Чорнобильської атомної електростанції [11]. При цьому зазначені події є як локальною небезпекою власне для екосистем, так і регіональною для населення та довкілля на значній території [12, 13].

Глобалізація у світі призводить до посилення техногенних чинників [14]. Проблема захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру в сучасних умовах набуває особливої значущості, особливо від небезпек воєнного характеру. Це пояснюється щорічним стійким

зростанням кількості і масштабів катастроф, істотним зростанням людських і матеріальних втрат.

Однією з найважливіших складових забезпечення захисту населення та економіки від сучасних загроз є підвищення пожежної безпеки будівель та споруд. Пожежі і вибухи, що виникають на об'єктах небезпечні не лише людськими втратами, але і значними фінансовими затратами, внаслідок руйнувань і відновлення працездатності об'єктів [15].

Ще один чинник – це поява нових речовин та матеріалів [16]. Передові технології в будівництві передбачають використання великої кількості будівельних матеріалів і конструкцій [17]. Застосування матеріалів і конструкцій передбачає дотримання вимог безпеки при експлуатації будівель та споруд у відповідності з вимогами нормативних документів [18].

Хоча і спостерігається останнім часом технічний прогрес у будівництві та методологіях протидії пожежам [19, 20], останні не стали менш небезпечними [21]. На пожежах гинуть тисячі людей, а збитки від них сягають мільярдів доларів. Близько 51 % від усіх пожеж, що виникають в світі, відбуваються у будівлях (спорудах) та на транспорті. При цьому в приміщеннях гине 90 % від всієї кількості жертв на пожежах.

Пожежі в приміщеннях будівель та споруд є одним з найбільш небезпечних чинників, які створюють потребу в захисті людини від їх впливу [22].

Небезпека загорянь в приміщеннях будівель та споруд виникає внаслідок порушення нормальної експлуатації електроприладів, витоку газу, необережного поводження з легкозаймистими та вибухонебезпечними речовинами, недосконалостей технологічних процесів, розряду блискавки та занесення високотемпературних джерел запалення.

Протипожежний захист забезпечують технічні засоби [23] та організаційні заходи, які покликані запобігти впливу небезпечних чинників пожежі на людей [24]. Такі чинники призводять до опіків, отруєння, травмування чи загибелі

людей, а також заподіяння матеріальних, соціальних та екологічних збитків [25].

При пожежі у приміщенні за перші 10–20 хвилин вогонь поширюється лінійно по горючим конструкціям. Приміщення заповнюється димом, і розгледіти полум'я неможливо. Температура повітря в приміщенні експоненціально наростає до 300 °С. Це температура займання переважної більшості матеріалів [26]. Після 20 хвилин вільного розвитку пожежі, вона починає заповнювати об'єм приміщення чи будівлі. Ще через 10 хвилин починає руйнуватися скління вікон. Поступово починає збільшуватися приплив свіжого повітря, що впливає на розвиток пожежі. Температура досягає 900 °С. Настає фаза вигорання. Протягом наступних 10 хвилин досягається максимальна інтенсивність горіння, після чого відбувається фаза стабілізації пожежі. Якщо вогонь не може поширитися на інші приміщення, пожежа виходить назовні. У цей час відбувається обвалення пошкоджених будівельних конструкцій [27].

Безпеку людей і матеріальних цінностей необхідно забезпечувати шляхом урахування всіх стадій життєвого циклу об'єктів, використовуючи науковий супровід і моніторинг [28], проектування, будівництво, експлуатацію та виключати виникнення пожеж [29, 30].

Технічні засоби та організаційні заходи дозволяють запобігти виникненню пожежі. При цьому ймовірність виникнення та розвитку пожежі не перевищує унормованого допустимого значення [31, 32].

Пожежна безпека під час проектування, будівництва, реконструкції та зміни функціонального призначення будівель та споруд різного призначення ґрунтується на забезпеченні вогнестійкості будівельних конструкцій. Тому зниження незворотних наслідків від пожеж на об'єктах є першочерговою умовою збереження несучої здатності будівельних конструкцій.

Зазначені вимоги стійкості забезпечуються комплексом заходів, що включають в себе як застосування ефективних вогнезахисних покриттів для вогнезахисту будівельних конструкцій, так і технологію виконання будівельних

конструкцій [33]. Вогнезахисні покриття представлені широким спектром виробів, аналіз характеристик та параметрів яких потребує детального вивчення.

Саме тому збереження стійкості будівель та споруд при пожежах та інших стихійних лихах, а також збереження їх функціонального призначення після таких впливів, відіграє перше місце в умовах глобалізації та збільшення загроз для людини.

Створення передумов для ефективного оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій з обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів є актуальною проблемою. Розв'язання її дозволить підвищити точність моделювання нестационарного прогріву вогнезахисних залізобетонних конструкцій з достатньою точністю розрахунків використовуючи результати експериментів (випробувань на вогнестійкість) та/або результати чисельного моделювання в сучасних програмних комплексах.

Існуючі вимоги пожежної безпеки не завжди задовольняють сучасним викликам. Як приклад, випробування з оцінки ефективності вогнезахисту і вогнестійкості вогнезахисних конструкцій проводяться в умовах стандартного температурного режиму пожежі, що у більшості випадків не виконується. Тому існує загроза виникнення інтенсивних пожеж з більш високою температурою і швидкістю поширення (понад 900 °C протягом 5 хвилин) [34], які можуть супроводжуватися тепловим ударом полум'я по конструкціях та руйнуванням будівель.

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

1.1 Вогнестійкість будівельних конструкцій як умова безпечної експлуатації будівель та споруд

Експлуатація сучасних будівельних конструкцій, запроектованих і виготовлених згідно з вимогами чинних нормативних документів, може відбуватися десятиліттями. Проте, внаслідок впливу небезпечних чинників пожежі такі конструкції руйнуються протягом декількох годин або навіть хвилин [35].

Порушення загальної стійкості будівлі при пожежі відбувається внаслідок руйнування окремих елементів будівель та споруд. Небезпека обвалення несучих будівельних конструкцій, крім матеріальних збитків, також ставить під загрозу життя працівників об'єкта під час евакуації потерпілих, а також рятувальників під час гасіння пожежі. У переважній більшості випадків руйнування конструкцій призводить до повного знищення матеріальних цінностей, інженерного і технологічного обладнання. У зв'язку з цим збереження несучої здатності будівельними конструкціями при пожежі протягом заданого часу є актуальною проблемою [35].

Для оцінки відповідності будівельних конструкцій нормованим значенням межі вогнестійкості будівельної конструкції, визначено процедури оцінювання відповідності та порядок їх застосування [36] та основні вимоги до будівельних конструкцій. Такі вимоги направлені на забезпечення:

- безпеки життя та здоров'я людей [37–39];
- безпеки експлуатації будівлі [40];
- механічного опору і стійкості як будівлі в цілому, так і окремих будівельних конструкцій цього будинку [41];
- пожежної безпеки будівлі [42];
- захисту навколишнього середовища [43–44].

Виконання принципів забезпечення пожежної безпеки в будівництві базується на інженерно-технічному підході щодо оцінювання необхідного рівня безпеки при проєктуванні, будівництві, реконструкції, технічному

переоснащенні, капітальному ремонті, зміні функціонального призначення будівель та споруд. Основні вимоги пожежної безпеки в будівництві передбачають умову обмеження поширення вогню, диму і збереження несучої здатності конструкції протягом заданого проміжку часу [45]. Важливим напрямом забезпечення цих принципів є забезпечення нормованої вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій, шляхом дотримання норм при їх виготовленні, розробки ефективних методів та засобів вогнезахисту та оцінки вогнестійкості таких конструкцій.

Відповідно до Європейських норм розрізняють наступні види граничних станів будівельних конструкцій з вогнестійкості (рис. 1.2): за ознакою втрати несучої здатності (R), цілісності (E) та теплоізолювальної здатності (I).

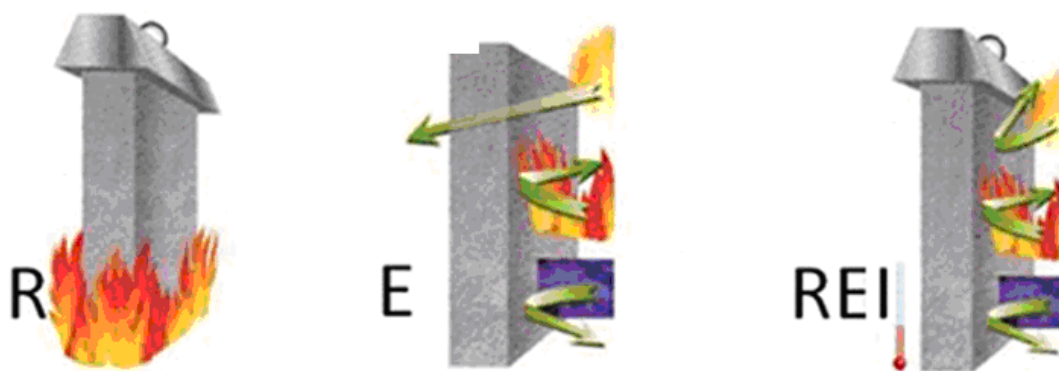


Рис. 1.2 Граничні стани з вогнестійкості будівельних конструкцій

Значення меж вогнестійкості будівельних конструкцій, з яких складається будівля чи споруда, впливають на архітектурне рішення та параметри забудови в цілому.

Для оцінки відповідності будівельних конструкцій нормованим значенням межі вогнестійкості напрацьовані методи та підходи щодо забезпечення вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій та визначено процедури оцінювання відповідності та порядок їх застосування.

Межа вогнестійкості будівельних конструкцій та їх елементів нормується і визначається проведенням випробувань на вогнестійкість при стандартному температурному режимі пожежі. Вказане не завжди задовольняє сучасним вимогам пожежної безпеки до будівель і споруд. Наприклад на об'єктах промисловості, пожежі характеризуються швидким підвищенням температури до 1100 °С на початку свого розвитку у зв'язку з великим пожежним навантаженням.

Оцінювання вогнестійкості може проводитись розрахунковими [46] та експериментальними [47] методами за стандартами або за розробленими методиками [48]. Експериментальні методи передбачають натурні вогневі випробування будівельних конструкцій, фрагментів будівлі або будівлі в цілому [46–49]. Вказані дослідження обмежені в частині їх застосування при оцінюванні вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій, в тому числі і кабельних тунелів [49], з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів.

Як видно із аналізу [46–49] умовами забезпечення вогнестійкості є:

– за часовими параметрами:

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ}, \quad (1.1)$$

де $t_{fi,d}$ – розрахункова межа вогнестійкості, хв.; $t_{fi,requ}$ – нормована межа вогнестійкості, хв.

– за міцнісними параметрами:

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}, \quad (1.2)$$

де $R_{fi,d,t}$ – розрахункове значення несучої здатності окремої конструкції під час пожежі в момент часу t , кН; $E_{fi,d,t}$ – розрахункове значення навантажувального ефекту під час пожежі в момент часу t , кН;

– за температурними параметрами:

$$\Theta_d \leq \Theta_{cr,d}, \quad (1.3)$$

де Θ_d – розрахункове значення температури матеріалу, °С; $\Theta_{cr,d}$ – розрахункове значення критичної температури матеріалу, °С.

Міцність і жорсткість залізобетонних елементів конструкцій знижуються з підвищенням температури. Особливо важливо відчувається зниження таких характеристик в діапазоні температур 400 – 700 °С. Найбільш простим способом розрахунку будівельних конструкцій, підданих впливу пожежі, є розрахунок будівлі при заданих температурних режимах пожежі. Після цього відбувається перевірка температури вогнезахисених елементів конструкцій. Температура не повинна перевищувати критичного значення або не перевищувати відсоток від несучої здатності конструкції при впливі температури пожежі.

Таким чином, для забезпечення нормованих значень меж вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій пропонується використовувати підходи та засоби: збільшення захисного шару бетону, оштукатурювання, конструктивні заходи, використання води в якості охолоджуючого засобу. Проте, останнім часом більшого поширення набули методи підвищення вогнестійкості залізобетонних конструкцій шляхом використання вогнезахисних покриттів.

Сучасні підходи із забезпечення безпеки та стійкості будівель і споруд в умовах пожежі (на прикладі Єврокодів) передбачають використання альтернативних методів розрахунків, заснованих на експлуатаційних характеристиках матеріалів та елементів конструкцій.

Необхідні експлуатаційні характеристики будівельних конструкцій в умовах впливу пожежі приймаються, як правило, за табличними даними, які передбачають мінімальні розміри конструкції і мінімальну товщину вогнезахисного покриття [50].

Частина 2 EN 1992 поширюється на проектування залізобетонних конструкцій у випадку виникнення аварійної ситуації під час пожежі та призначена для використання разом з EN 1992-1-1 та EN 1991-1-2. Частина 1-2 визначає відмінності або доповнює вимоги до проектування за нормальної температури. Частина 2 EN 1992 стосується тільки пасивних методів вогнезахисту. Активні методи захисту не наведені. Частина 1-2 EN 1992 поширюється на залізобетонні конструкції, що мають виконувати конкретні функції під час пожежі:

- запобігання передчасного руйнування будівельної конструкції (втрата несучої здатності);
- обмеження поширення полум'я поверхнею за межі визначених зон (втрата теплоізолювальної здатності).

Національні стандарти реалізують Єврокоди та містять їх повний текст (включаючи всі технічні доповнення) відповідно до того, в якому вигляді були опубліковані Європейським комітетом по стандартизації. Перед текстом самого Єврокоду розташовані національна титульна сторінка і національний вступ, за якими викладені національні додатки, що містять інформацію за тими параметрами, які залишені відкритими в Єврокодах для їх вибору на національному рівні. Ці параметри відомі як національно визначальні параметри. Вони застосовуються для проектування будівель і виконання будівельних робіт у країні, що їх запровадила.

Аналіз сучасного стану забезпечення безпеки будівель та споруд промислового та цивільного призначення показав наявність протиріч, що виникають в процесі аналізу умов забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій. Розв'язання цих протиріч створить умови для безпечної експлуатації будівель та споруд, виконаних із вогнезахисних залізобетонних конструкцій з обґрунтованими параметрами та умовами експлуатації вогнезахисних покриттів.

1.2 Вимоги пожежної безпеки до будівельних конструкцій, які використовуються в сучасному будівництві

Межа вогнестійкості будівельної конструкції залежить в першу чергу від властивостей матеріалів [51] та технології виготовлення такої конструкції [52], розмірів [53], умов та величини прикладеного навантаження [54], наявності елементів вогнезахисту, а також від параметрів розвитку пожежі [55].

Разом з тим, для забезпечення нормованих значень меж вогнестійкості залізобетонних конструкцій вищенаведених об'єктів до 150–180 хвилин і більше, зазвичай доводиться збільшувати в конструкціях товщину захисного шару бетону до 50–70 мм, а в деяких випадках і більше. Таке збільшення товщини захисного шару бетону зводить до мінімуму позитивні властивості високоміцних бетонів і конструкцій, тому що призводить до збільшення маси будівельної конструкції, навантаження на будівлю та до зменшення площі приміщень [56]. До недоліків конструктивних бетонів також можна віднести таке явище як вибухоподібне руйнування при дії температури, що в умовах пожежі може призвести до зменшення робочого перерізу конструкції і зниження її межі вогнестійкості аж до повної втрати.

Рекомендації щодо запобігання вибуховому руйнуванню залізобетонних конструкцій включають заходи щодо використання певних наповнювачів в структурі конструкції, застосування спеціальних металевих сіток, що можуть запобігти відколюванню шматків бетону [57]. Реалізація такого підходу спричиняє зміну рецептури залізобетону, що може вплинути на його міцнісні властивості [58].

Проте, не менш важливим аспектом руйнування конструкцій, внаслідок пожежі є лавиноподібне руйнування будівель та споруд. Прикладів таких пожеж у світі досить багато, при цьому – більшість відбувалася в будівлях та спорудах із залізобетону. Такі надзвичайні ситуації виникають через помилки проектувальників при проектуванні будівлі, відступах від проекту при виконанні будівельних робіт. Також це можливо внаслідок порушення правил

монтажу, введення в експлуатацію будівлі або споруди з великими недоробками, при порушенні правил експлуатації будівлі, а також внаслідок надзвичайної ситуації природного чи техногенного характеру.

В технічному аспекті постає проблема захисту об'єктів (будівель та споруд) від прогресуючого обвалення при надзвичайних ситуаціях (ударах, вибухах, пожежах) внаслідок втрати вогнестійкості залізобетонних колон при пожежі [59], комбінованому впливові вибуху-пожежі [60].

Існують моделі [61–62] для визначення вогнестійкості залізобетонних колон шляхом урахування впливу найбільш значущих параметрів: розтріскування бетону при впливові пожежі, ефект місцевого випучування поздовжніх арматурних стрижнів, викликаного вибуховим сколюванням. Однак, поза увагою дослідників залишилися питання щодо розробки комп'ютерної моделі вогнезахисної залізобетонної колони з обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів.

Обваленню часто може сприяти вибух, внаслідок акту терористичного характеру, порушення безпечних умов експлуатації побутових газопроводів, необережного поводження з вогнем, зберігання в будівлях горючих та легкозаймистих речовин.

Великий вплив на вогнестійкість залізобетонних конструкцій мають сталеві арматурні стержні. Завдяки значній міцності і густині металу, ефективності з'єднання елементів, високого ступеня індустріальності, виготовлення і монтажу, сталеві арматурні стрижні мають порівняно малу вагу, є газо- і водонепроникливими та за допомогою них здійснюється швидкий монтаж будівель і споруд з метою прискореного введення їх в експлуатацію [63].

При цьому всі сталеві арматурні стержні при досягненні певної температури в умовах пожежі можуть втрачати частину своєї несучої здатності. Міцність сталі при високій температурі було детально вивчено і встановлено, що при температурі близько 500–550 °С сталеві стрижні несуть 60 % від проектного навантаження за нормальних умов. Таким чином, температура в 500

°C вважається критичною температурою, при якій будівля чи споруда, виготовлені з використанням сталевих конструкцій, зможе витримати. Поряд з цим, останні дослідження встановили, що температура відмови сталевих конструкцій будівлі (критична температура) не завжди визначається 500 °C, а залежить від двох факторів – температури нагрівання елемента та навантаження, що прикладене до нього [63–66].

В [63] критична температура варіюється від 100 °C до 400 °C і більше, використовуючи експериментальні значення коефіцієнту теплопровідності вогнезахисного покриття, отриманого для умов стандартного температурного режиму пожежі. Однак дослідження обмежене критичною температурою в 400 °C, хоча вона може досягати і температури 750 °C. В [64] при випробуваннях крім стандартного температурного режиму пожежі використовується і режим зовнішньої пожежі.

У [65] досліджені експлуатаційні характеристики вогнезахисних покриттів з використанням, крім стандартної і вуглеводневої кривої, дві самостійно відтворені криві зі зниженою температурою.

В [66] представлені результати експериментального дослідження двох типів вогнезахисних покриттів, які піддавалися впливу трьох нестандартних кривих горіння. В результаті встановлено, що постійний ефективний коефіцієнт теплопровідності вогнезахисного покриття при нестандартних пожежах становив на 65 % і на 35 % вище, ніж при стандартній пожежі, що призвело до завищення часу руйнування покриття до 15 і 11 хвилин відповідно. Тому іноді небезпечно використовувати результати стандартних випробувань на вогнестійкість, що визначають розрахунок товщини покриття вогнезахищених будівельних конструкцій в нестандартних умовах пожежі.

У [67] представлена загальна процедура моделювання теплового стану вогнезахищеної будівельної конструкції. Процедура дозволяє використовувати як спрощені, так і розширені методи розрахунку. Проте не надано обґрунтування щодо використання результатів лабораторних випробувань для їх застосування при повномасштабних випробуваннях.

Отже, межа вогнестійкості незахищених залізобетонних конструкцій без вогнезахисту є недостатньою і без відповідної оцінки вогнестійкості цих конструкцій проектування об'єктів будівництва носить абстрактний характер, як і рівень забезпечення пожежної безпеки об'єкта в цілому [68]. Крім того, вибір способу вогнезахисту пов'язаний з великими матеріальними витратами [69] (до 20 % від загальної вартості конструкції) (рис. 1.3).

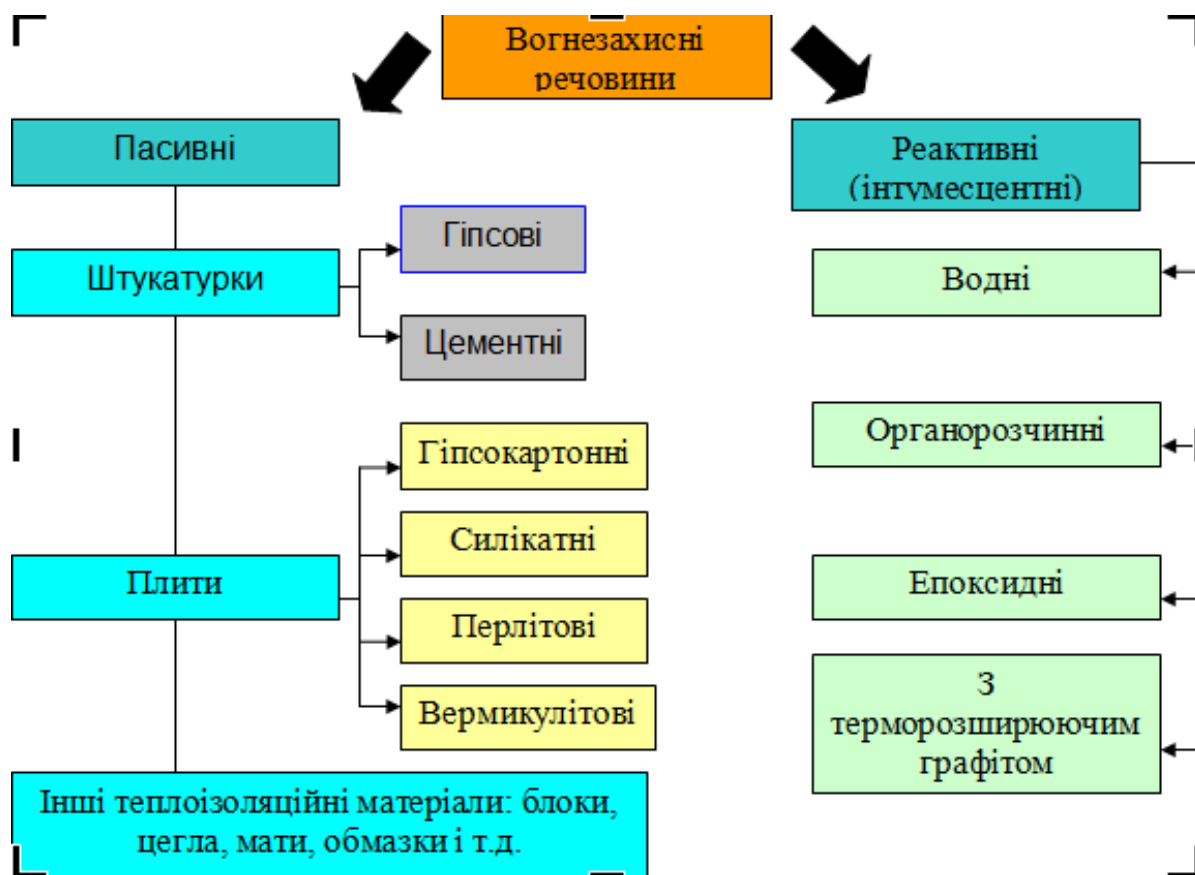


Рис. 1.3 Сучасні методи і підходи щодо забезпечення вогнезахисту

Тому, визначення вогнезахисної здатності для пасивних вогнезахисних покриттів дасть можливість збільшити конкурентоспроможність та зменшити вартість таких матеріалів [70].

Ефективним способом підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій є застосування реактивних (таких, що спучуються) вогнезахисних покриттів в залежності від умов експлуатації і атмосферних чинників [71, 72] та збереження цілісності покриття протягом терміну його використання [73].

Існує значна кількість алгоритмів та способів вогнезахисту будівельних конструкцій [74]. Вибір коректного рішення дозволяє мінімізувати витрати та домогтися ефективної реалізації проекту [75].

З огляду на велику кількість і багатогранність описаних факторів, забезпечення вогнестійкості несучих елементів залізобетонних будівельних конструкцій є важливою і досить складною проблемою. Вирішення такої проблеми дозволить на стадії проектування, будівництва та експлуатації будівель і споруд забезпечити їх стійкість при високотемпературному впливі або при руйнуванні внаслідок порушення нормального циклу функціонування об'єкту.

1.3 Аналіз статистичних даних

1.3.1 Статистика пожеж

У світі сьогодні існує понад 250 країн, в яких проживає понад 7 мільярдів людей. Щорічно виникає близько 8 мільйонів пожеж, на яких гине приблизно 90 тис. людей.

Близько 51 % всіх пожеж виникають в будівлях і спорудах та на транспорті, і при цьому на таких пожежах гине більшість (90–95 %) від жертв на пожежах. Винятком є Барбадос, Польща і Португалія, де пожежі в будівлях і на транспорті складають менше 22 % від загальної кількості, а також Литва і Естонія – менше 30 %. Проте в Росії, Україні та Сінгапурі пожежі в будівлях і на транспорті складають не менше 75 % від загальної кількості. Кількість пожеж в Україні, що сталися у будівлях та спорудах упродовж 2007–2020 років, в середньому, складає 52,7 % від загальної чисельності, а кількість загиблих на них – 95,5 %. За визначений період в середньому знищено або пошкоджено 25 706 будівлі та споруди різного призначення, з яких 5933 будівлі зруйновано повністю. Згідно статистичних даних за 2020 рік 31,2 % від загальної кількості пожеж в Україні, а саме 31642, трапилося у будівлях та спорудах; 4,3 % (4386) –

на транспорті; 62,3 % (63075) припадає на місця відкритого зберігання матеріалів, відкриті території, зовнішні установки тощо; 2,2 % (2176) – на інші об’єкти, що не ввійшли до переліку. Упродовж 2020 року пожежами знищено та пошкоджено 28029 будівель і споруд різного призначення, з яких 7106 зруйновані повністю, у тому числі 796 житлових будинків. З усієї кількості знищених та пошкоджених пожежами у 2020 році будівель і споруд – 11707 (41,8 %) – мали III ступінь вогнестійкості, 5373 (19,2 %) – V ступінь вогнестійкості, 2889 (10,38 %) – мали IIIa ступінь вогнестійкості.

З повністю знищених 7 106 будівель 2020 році 2263 (31,9 % від загальної кількості знищених будівель і споруд) споруди мали V ступінь вогнестійкості, 1531 (21,6 %) мали III ступінь вогнестійкості, 841 (11,8 %) – IIIa ступінь вогнестійкості, 431 (6,1 %) – IV ступінь вогнестійкості, 246 (3,5 %) – IIIb ступінь вогнестійкості, 108 (1,5 %) – IVa ступінь вогнестійкості, 86 (1,2 %) – II ступінь вогнестійкості та 12 (0,2 %) – I ступінь вогнестійкості.

Як видно із проведеного аналізу, найбільші втрати припадають на будівлі III ступеню вогнестійкості, до яких встановлені досить високі вимоги щодо вогнестійкості будівельних конструкцій.

1.3.2 Аналіз надзвичайних ситуацій та пожеж, пов’язаних з втратою вогнестійкості

Не дивлячись на технічний прогрес у будівництві та техніці для ліквідації пожеж, і в наші дні пожежі не стали менш небезпечними. Масштабні трагедії, пов’язані з пожежами, забирають і зараз тисячі життів, а також призводять до мільйонних збитків.

До таких наслідків привели: пожежа в Сан-Паулу (1 лютого 1974 року) в 24-поверховому будинку на 12 поверсі, яка призвела до загибелі 179 людей і травмування близько 300; пожежа в готелі «Росія» (Москва), що сталася 25 лютого 1977 року та забрала 42 людські життя.

Пожежа в місті Карамай (Китай) сталася в Палаці культури «Зал Дружби» 8 грудня 1994 року та призвела до загибелі 323-х осіб, з яких 288 – діти. Пожежа, що сталася в 2-х хмарочосах-близнюках Всесвітнього торгового центру в Нью-Йорку внаслідок терористичного акту 11 вересня 2001 року, яка призвела до їх обвалення і загибелі близько 3-х тисяч осіб. Пожежа у хмарочосі «Віндзор» в Мадриді 14 квітня 2005 року призвела до повного обвалення конструкцій будівлі.

У ніч на 16 червня 2009 року на нафтопереробному заводі в Комсомольськ-на-Амурі виникло факельне горіння мазуту в результаті розгерметизації фланцевого з'єднання. Пожежу ліквідували за дві години, постраждалих і загиблих не було.

27 грудня 2010 року відбувся вибух на нафтопереробній установці ТОВ «Забайкальська нафтопереробна компанія» в селищі Даурія на Забайкаллі. В результаті вибуху загинули п'ятеро людей – всі п'ятеро громадяни Китайської Народної Республіки, які перебували в епіцентрі вибуху. Установка в результаті вибуху і подальшого розвитку факельного горіння була зруйнована на 90 %.

Причинами пожежі на Саратовському нафтопереробному заводі 4 жовтня 2012 року стала негерметичність перекриття вузла клапанної збірки. В результаті чого стався викид парогазової фази газойля з дренажного вентиля з подальшим займанням і виникненням факельного горіння.

Пожежа на нафтовій платформі «Abkatun Alfa» в Мексиканській затоці забрала життя 15 людей, більше 50 осіб постраждало. Матеріальні збитки оцінюються в десятки мільйонів доларів.

Матеріальні збитки від пожежі в резервуарному парку установки підготовки нафти «Уса» (Республіка Комі, 21 травня 2014 року) склав понад 53 мільйонів рублів.

В червні 2014 року сталася аварія на Ачинському нафтопереробному заводі. Вибух вуглеводневого газу на газофракційній установці призвів до виникнення факельного горіння, з подальшим поширенням пожежі на площу 400

квадратних метрів. В результаті даного інциденту 8 осіб загинуло і 24 людини постраждало. Збиток від пожежі оцінюється в 800 млн. доларів і є одним з найбільших страхових збитків в світі в нафтогазовому секторі.

Найбільш часто прогресуюче обвалення спостерігається при дії на конструкції будівель та споруд температурного впливу пожеж [76, 77].

В [77] представлена імовірнісна методологія, заснована на термомеханічному аналізі скінчених елементів з дослідження впливу мінливості теплових властивостей бетону на пожежну безпеку конструкцій і будівлі в цілому.

28 серпня 2019 року в місті Дрогобич Львівської області ймовірно внаслідок вибуху (детонаційне горіння) відбулося обвалення цілого під'їзду чотириповерхової будівлі. За довідкою ГУ ДСНС у Львівській області, чотириповерховий цегляний будинок, побудований в 1960 році, на 64 квартири. Обвалився другий під'їзд, в якому знаходилося 15 квартир і перукарня: 7 квартир зруйновано (4 однокімнатні, 3 трикімнатні і приміщення перукарні), отримали пошкодження 8 квартир (3 двокімнатні, 5 трикімнатних).

В Російській Федерації з 1995-го по 2006 роки відбулося як мінімум 7 випадків великих обвалень будівель, по причині вибуху побутового газу. Також в 2015 році обрушилася частина казарми під Омськом.

Обвалення торгового центру Сампун сталося 29 червня 1995 в районі Сочхогу в Сеулі, Республіка Корея. Це найбільша катастрофа мирного часу в історії Південної Кореї. В результаті обвалення будівлі загинуло 502 людини, 937 отримали поранення. До терактів 11 вересня в США і обвалення Рана-Плаза в Бангладеш це було найбільшим за кількістю жертв обваленням будівлі в сучасній світовій історії.

На проспекті Юрія Гагаріна (Російська Федерація) з ранку 31 січня 2020 року зносили будинок спортивного комплексу «Петербурзький». На його місці мали намір побудувати найбільшу льодову арену світу. В процесі демонтажу стався обвал, в результаті якого загинула одна людина.

21 вересня 2020 року відбулося обвалення триповерхової будівлі в місті Бхіванді, розташованому недалеко від мегаполісу Мумбаї в Індії, в результаті якого 39 людей загинуло. Будівля в передмісті Мумбаї обвалилася в понеділок близько 4:00 за місцевим часом. Після обвалення місцеві жителі допомогли вибратися з-під завалів майже 20 мешканцям, ще до 25 осіб залишалися під завалами.

Внаслідок вибуху газу 27 лютого 2012 року в дев'ятиповерховій житловій будівлі, розташованій в місті Астрахань вибуховою хвилею зруйновано 4 перших поверхів будинку. Коли свідки трагедії стали допомагати постраждалим мешканцям, під'їзд впав повністю. В результаті події постраждали 12 осіб, в тому числі двоє дітей.

16 травня 2019 року в Шанхаї обвалилася будівля, внаслідок чого загинула 21 людина. Інцидент стався, коли в будівлі впав дах. Всі потерпілі – робітники, які розбудовували фабрику під автосалон.

Аналіз статистики свідчить, що проблема захисту від лавиноподібного руйнування будівель та споруд внаслідок пожеж і вибухів побутового газу чи детонації боєприпасів є досить актуальною. Вона потребує детального вивчення з урахуванням світового досвіду та зводиться до конструктивних рішень при проектуванні, врахуванні експлуатації будівельних конструкцій при аварійних режимах, в тому числі передбачення використання вогнезахисних будівельних конструкцій.

Найважливішою властивістю, якою повинна володіти будівля чи споруда, є живучість, що означає властивість конструкції частково або повністю забезпечувати своє функціональне призначення при відмові окремих конструктивних елементів [78, 79].

В міжнародних нормах пожежної безпеки будівель і споруд введені спеціальні регламентації часу, протягом якого будівельні конструкції, будівлі та споруди повинні чинити опір комбінованим впливам робочих навантажень і високотемпературній дії пожеж [79]. Цей час опору ув'язується в нормах з

іншими елементами системи протипожежного захисту, такими як протипожежні перешкоди, розриви, заходи з евакуації людей.

Аналіз подій 11 вересня 2001 року та інших аварій показав, що необхідно більше уваги приділяти прогресуючому руйнуванню при вирішенні питань забезпечення безпеки об'єктів, в тому числі і за рахунок застосування на об'єктах вогнезахисних залізобетонних конструкцій з науково обґрунтованими та унормованими параметрами [80].

Проведений аналіз показав, що велика кількість надзвичайних ситуацій, в тому числі внаслідок пожеж, відбувається внаслідок нехтування або неврахування під час проєктування вимог щодо вогнестійкості будівельних конструкцій, з яких складаються будівлі та споруди.

Нові технології будівництва передбачають широке застосування різноманітних будівельних конструкцій, використання яких, як правило, передбачає обов'язкові нормативні вимоги в дотриманні меж вогнестійкості та поширення вогню. Зазначені вимоги можуть бути забезпечені комплексом або системами захисного шару, що передбачається як технологією виробництва (залізобетонні конструкції, сендвіч-панелі) [81], так і застосуванням реактивних та пасивних вогнезахисних покриттів. Вогнезахисні покриття представлені широким спектром як вітчизняного, так і закордонного виробництва, аналіз характеристик яких потребує детального вивчення. Враховуючи викладене, актуальним є визначення ефективних засобів, технологій та методів розрахунку вогнестійкості будівельних конструкцій та параметрів вогнезахисту будівельних конструкцій.

1.4 Сучасні підходи забезпечення вогнестійкості

Одним з факторів, на якому ґрунтується пожежна безпека під час проєктування, будівництва, розширення, реконструкції, технічного переоснащення, капітального ремонту, зміни функціонального призначення

будівель та споруд різного призначення є забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій та їх стійкості не поширювати вогонь.

Вогнезахист будівельних конструкцій є складовою частиною системи заходів щодо забезпечення пожежної безпеки і вогнестійкості будівель і споруд.

Завдання вогнезахисту зводиться до створення на поверхні конструкцій теплоізолюючих екранів з низькою теплопровідністю, здатних витримувати високі температури, а також ізолювати поверхню конструкції від прямої дії вогню. Такі екрани дозволяють сповільнити прогрівання конструкції, що підвищує фактичну межу вогнестійкості і зберігає його властивості при пожежі протягом заданого періоду часу.

В результаті досліджень [82] отримані граничні пороги початку спучування вогнезахисного покриття та встановлено, що на початок спучування покриття безпосередньо впливають умови нагріву на відкритій поверхні і вихідна товщина нанесеної вогнезахисної речовини. При цьому відсутні достовірні дані щодо умов нагріву в вогневій печі вогнезахисних конструкцій.

В [83] описано випробування вогнезахисних будівельних конструкцій зменшених розмірів в умовах вуглеводневої пожежі, в результаті чого доведено ефективність запропонованої лабораторної печі як додаткового інструменту для промислових випробувань на вогнестійкість. Проте не визначено достовірність результатів, отриманих на зразках зменшених розмірів, і можливість їх застосування при великомасштабних випробуваннях.

Дослідження [84] присвячене розробці реактивних вогнезахисних речовин на основі епоксидної смоли, поліакрилової кислоти та описано вплив основних складових розроблених композицій на вогнезахисні характеристики утворених покриттів. Однак, поза увагою дослідників залишилися питання впливу теплофізичних характеристик покриттів, факторів оточуючого середовища на вогнестійкість вогнезахисних конструкцій.

Вогнезахисні речовини застосовують для підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій – здатності конструкцій зберігати їх несучі та (або) огорожувальні функції під час пожежі [85–87].

В [85] обґрунтовано основні критерії при оцінці вогнезахисної ефективності покриттів інтумесцентного типу, що базуються на вивченні фізико-хімічних параметрів теплоізоляційного спученого шару. При цьому залишилися невисвітленими питання впливу теплофізичних характеристик покриттів на вогнестійкість вогнезахищених конструкцій.

У [86] представлені результати детальної оцінки методу, який можна використовувати для прогнозування поведінки вогнезахисного покриття і теплопровідності в різних умовах (товщини покриття і характеру впливу пожежі). Однак, не наведено точність методу і його адекватність при довільних режимах пожежі, а звідси і ефективність методу.

В [87] проведено прогнозування вогнестійкості будівельних конструкцій на основі моделі для дослідження теплофізичних характеристик покриття вогнезахисних покриттів. Проте, не наведено даних, які б давали можливість прогнозувати вогнестійкість вогнезахищених конструкцій при змінних параметрах теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів.

Вогнезахисні матеріали не мають вогнестійкості окремо від будівельних конструкцій, які вони захищають. Тому оцінювання вогнезахисної здатності цих матеріалів пов'язане з оцінюванням вогнестійкості захищених будівельних конструкцій [88]. При цьому відкритим залишається питання щодо правильності і точності задавання параметрів вогнезахисних покриттів для моделювання нестационарного прогріву вогнезахищених конструкцій.

Отже, оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій (окремої конструкції, частини конструктивної системи або конструктивної системи в цілому), у тому числі із застосуванням вогнезахисних речовин, враховує такі етапи:

- вибір проектних сценаріїв пожежі;
- визначення відповідних температурних режимів пожежі;

– визначення підвищення температури (теплого стану) в будівельних конструкціях та (або) напружено-деформованого стану будівельних конструкцій в умовах пожежі.

1.4.1 Вогнезахист залізобетонних конструкцій

Вогнезахист залізобетонних будівельних конструкцій є складовою частиною системи заходів щодо забезпечення пожежної безпеки і вогнестійкості будівель і споруд [89].

Одним із способів зменшення втрат, що викликані пожежею, є застосування вогнезахисних покриттів. За оцінками експертів, не існує покриттів, що здатні здійснювати захист будівельної конструкції від впливу вогню впродовж тривалого часу. Основна мета їх застосування полягає у затриманні підвищення температури будівельної конструкції та відповідно, втрати властивостей. Пріоритетною задачею для закордонних розробників вогнезахисних покриттів є створення нових, ефективніших та вдосконалення вже існуючих вогнезахисних матеріалів, що здатні суттєво знижувати пожежну небезпеку об'єктів, що захищаються [90].

До найбільш поширених матеріалів, що використовуються при пасивному вогнезахисту, відносяться:

– конструктивні вогнезахисні матеріали – екрани (плити, сегменти, цеглини) на основі негорючих теплоізолюючих і теплопоглинальних матеріалів – перліту, вермикуліту, вогнетривких волокон з наповнювачами [91, 92];

– вогнезахисні штукатурні суміші спеціального складу, які підвищують межу вогнестійкості залізобетонних конструкцій до 240 хвилин;

– вогнестійкі гіпсокартонні плити [93].

Вогнезахисні штукатурки є, як правило, цементно-вермікулітовим складом з комплексом спеціальних добавок, який утворює покриття з високою адгезійною міцністю до бетонних поверхонь і відносно низькою щільністю

(240–400 кг/м³) [94]. Склад поставляється у вигляді сухої будівельної суміші, яка після додавання води наноситься механізованим способом з отриманням покриття товщиною 10–50 мм залежно від необхідної межі вогнестійкості.

Механізм дії покриттів цього типу полягає в зниженні швидкості прогрівання бетону або металу за рахунок теплоізолюючих властивостей захисного шару. До незаперечних переваг вогнезахисних штукатурок слід віднести:

- високий ступінь пожежної безпеки, який полягає у відсутності димоутворення і токсичних продуктів горіння;
- велика межа вогнестійкості – до 360 хвилин і більше, що перевищує аналогічний показник для гіпсокартонних плит;
- порівняно низька вартість матеріалу.

Для вогнезахисту залізобетонних конструкцій можуть використовуватися різноманітні вогнезахисні покриття та облицювання. Ці матеріали мають різні теплофізичні характеристики (густина ρ , коефіцієнт теплопровідності λ , питому об'ємну теплоємність $c \cdot \rho$), і, відповідно, можуть мати різні значення необхідної мінімальної товщини для забезпечення нормованої межі вогнестійкості залізобетонної конструкції. Рецептuru таких вогнезахисних матеріалів постійно удосконалюється, тому дуже важливо знати ступінь впливу того чи іншого коефіцієнта на вогнезахисну здатність покриття чи облицювання, при цьому також необхідно враховувати умови теплового впливу на конструкцію з вогнезахистом під час пожежі [95, 96].

У [97] проведено експериментальні дослідження вогнезахисної дії покриття на основі гелеутворюючої системи у всіх точках факторного простору. Отримано рівняння регресії, яке описує вплив якісного та кількісного складу покриття на його вогнестійкість. Однак, невирішеними залишилися питання впливу товщини покриття на вогнестійкість конструкції з урахуванням науково обґрунтованих параметрів вогнезахисного покриття.

Авторами [98] досліджено вплив параметрів вогнезахисних покриттів на основі силіційелементорганічних сполук на деформаційні характеристики

залізобетонних конструкцій в інтервалі температур 293-1273 К. Вивчено вплив складу покриття на властивості залізобетону при дії вогнища пожежі. Однак поза увагою дослідників [98] залишилися питання впливу товщини покриття на вогнестійкість вогнезахищеного залізобетонного перекриття.

У [99] експериментально визначено вогнестійкість залізобетонних вогнезахищених балок із застосуванням вогнезахисного покриття на основі вермикуліту-перліту. Проте в роботі не наводяться дані щодо визначення теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття, як основного параметру при оцінюванні вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій.

Штукатурки на основі легких наповнювачів при невеликих обсягах робіт можуть наноситися із застосуванням ручного штукатурного інструменту, однак найбільш технологічним процесом є оштукатурювання методом мокрого торкретування. Торкретування дозволяє створювати вогнезахисні покриття, що точно повторюють форму будівельної конструкції, яка захищається [100, 101].

Існує велика кількість пасивних вогнезахисних покриттів для захисту залізобетонних конструкцій.

Вогнезахисний штукатурний склад «СОШ-1» (R 45–R 240) представляє собою суміш на основі в'язучого компонента з перлітовим піском виробництва компанії «Кроз». Призначений для захисту від дії вогню несучих залізобетонних будівельних конструкцій висотних будівель, транспортних тунелів, підземних автостоянок і гаражів. Забезпечує вогнестійкість залізобетонних конструкцій від 45 до 240 хвилин (залежно від виду бетону конструкції, класу робочої арматури і її положення в перетині конструкції). Крім того, відомі пасивні вогнезахисні покриття, виробництва тієї ж компанії: високодисперсна фарба «ОЗК-01» і вогнезахисні покриття «ІЗОВЕНТ-ПЖ» і «ІЗОВЕНТ-УП». За даними виробника вогнезахисна фарба «ОЗК-01» – це найпростіший і високотехнологічний спосіб вогнезахисту залізобетону. Фарба наноситься на ґрунт ГАЗ-К (товщиною 0,05 мм) і при товщині сухого шару 1,1 мм і витраті 1,9 кг/м² має вогнезахисну ефективність не менше 120 хвилин

при досягненні граничного стану. Покриття «Ізовент–ПЖ» призначене для підвищення межі вогнестійкості залізобетонних конструкцій і являє собою композиційну плиту, розмірами 1200×600 мм.

Пасивне вогнезахисне покриття «Девіспрей» для підвищення межі вогнестійкості будівельних конструкцій до 150 хвилин. Пасивне вогнезахисне покриття «Девіспрей» складається з каолінового волокна, неорганічного в'язучого (портландцементу) та спеціальних добавок.

Вогнезахисне покриття «Неоспрей» складається зі спученого вермикуліту, неорганічного в'язучого, наповнювачів і цільових добавок. Вогнезахисна обробка покриттям Неоспрей підвищує межу вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій до 240 хвилин. Недоліком всіх перерахованих пасивних вогнезахисних покриттів є неможливість застосування на відкритих майданчиках під впливом кліматичних факторів, велика товщина покриття, дороге обладнання для нанесення.

ТОВ «Технотерм Груп» виготовляє високоефективний вогнезахисний склад «Сотерм–1Б», призначений для вогнезахисту залізобетонних конструкцій, експлуатованих як усередині приміщень, будівель і споруд промислового і цивільного призначення, так і поза ними. Склад, нанесений на залізобетонні багатопустотні плити перекриттів забезпечує межу вогнестійкості (REI) не менше 180 хвилин при товщині покриття 25 мм.

Для більшості вогнезахисних покриттів теплофізичні характеристики невідомі [102, 103], що ускладнює встановлення вогнестійкості вогнезахищених будівельних конструкцій та оцінювання їх ефективності при розрахунковому та експериментальному визначенні меж вогнестійкості таких конструкцій [104].

Тому детальний аналіз та дослідження властивостей вогнезахисних речовин [105, 106], в подальшому дозволить науково обґрунтувати параметри вогнезахисних покриттів для ефективного оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій [107].

Вибір конструктивного захисту проводиться на основі техніко-економічного розрахунку. Так, при бетонуванні необхідно враховувати конструктивні властивості бетону і конструкції в цілому. Облицювання цеглою негативно впливає на архітектурно-планувальні рішення, зменшуючи корисний об'єм. Нанесення штукатурок вимагає значних матеріальних затрат. Крім хімічного складу, ключовими визначальними факторами при використанні вогнезахисних покриттів стали граничні умови поверхні, що захищається, товщина нанесеного покриття, умови нагрівання і метод випробувань на вогнестійкість. Всі вони повинні бути розглянуті для проведення точних і систематичних випробувань і розробки середовища, яке дозволяє в явному вигляді кількісно оцінити ефективність вогнезахисних покриттів [108].

Як показує практичний досвід конструктивні заходи при своїй ефективності не знаходять широкого застосування через трудомісткість, а також складності їх проведення на стадії реконструкції при перепрофілюванні технології виробництва. Відзначені вище облицювання досить надійні і довговічні, однак вони суттєво збільшують масу конструкцій і є трудомісткими.

Прагнення знизити масу вогнезахисного облицювання призвело до розробки легких штукатурок і покриттів на основі азбесту, перліту, вермикуліту, фосфатних сполук та інших ефективних матеріалів.

Ці облицювання мають малу густину ($200\text{--}600\text{ кг/м}^3$) і тому низьку теплопровідність. Вони можуть застосовуватися для підвищення вогнестійкості конструкцій до 45 хвилин і більше.

Вогневі випробування показали, що, наприклад, вогнезахисне фосфатне покриття здатне при товщині 25 мм підвищити межу вогнестійкості колони коробчастого перерізу $200\times 200\times 16$ мм до 120 хвилин. Таку межу вогнестійкості облицювання із звичайного важкого бетону можна забезпечити тільки при товщині 50 мм. Тому застосування фосфатного покриття замість бетону знижує масу вогнезахисного облицювання в 10 разів [109].

Для вогнезахисного облицювання можна використовувати напівтверді мінераловатні плити, що кріпляться за допомогою сталевих анкерів і каркасів.

В останні роки більш широке використання для вогнезахисту будівельних конструкцій знаходять різні вогнезахисні покриття, лаки і фарби [110, 111].

В [112, 113] запропоновані вогнезахисні склади, що можуть працювати в умовах як стандартного температурного режиму, так і режиму вуглеводневої пожежі, що є досить актуальним для об'єктів нафтогазовидобувної галузі.

Розроблено цілий ряд вогнезахисних покриттів, в основному, на органічній основі [114–116].

У [114] досліджується важливість варіювання співвідношення звичайних вогнезахисних добавок вогнезахисних покриттів на основі акрилу та наводяться дані випробувань на вогнестійкість вогнезахищених будівельних конструкцій. При цьому не приводяться узагальнені дані щодо впливу добавок на вогнезахисну здатність покриття, а, відтак, і на вогнестійкість конструкції.

У [115] були приготовлені дві серії нових вогнезахисних покриттів зольгель методом, які містили плаваючі кульки летючої золи і гранульований доменний шлак. Результати показали, що геополімерне покриття перетворилося в шар для блокування передачі тепла і маси, що забезпечує зниження значення коефіцієнту теплопровідності. При цьому, основна увага дослідників приділяється складу вогнезахисного покриття, а не його вогнезахисним властивостям.

У [116] вперше розроблене ефективне реактивне вогнезахисне покриття на основі бензоксазину. Розроблений склад, що утворює покриття на сталевій поверхні, показав ефективний захист від вогню. Проте в дослідженні не наведено даних щодо визначення інших параметрів вогнезахисного покриття: теплопровідність, теплоємність, товщина.

У [117] представлені методологія та результати дослідження температурної залежності коефіцієнта теплопровідності, яку визначено в EN 13381-8, і товщини сухої плівки для одного типу вогнезахисного покриття в стандартних умовах пожежі, а також їх вплив на надійність покриття для захисту вогнезахищених конструкцій. Однак, поза увагою дослідників залишилися питання використання покриття при режимах пожежі, відмінних

від стандартного, і не приводяться дані щодо параметрів покриття для розрахункового оцінювання вогнестійкості вогнезахисних конструкцій.

Як свідчить проведений аналіз, існує велика кількість вогнезахисних речовин та матеріалів для підвищення меж вогнестійкості залізобетонних конструкцій. Проте, на сьогоднішній день недостатньо точно та не в повній мірі виокремлено перелік необхідних параметрів теплового стану вогнезахисних несучих залізобетонних конструкцій для забезпечення вогнестійкості будівель та споруд при їх експлуатації в умовах високотемпературного впливу пожежі, і як наслідок, втрата стійкості і експлуатаційної придатності як окремих конструкцій, так і будівлі в цілому [118].

1.5 Методи оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій

1.5.1 Експериментальні методи

Визначення меж вогнестійкості будівельних конструкцій, як з вогнезахистом так і без нього, можна проводити як розрахунковими методами (спрощений метод, уточнений метод, визначення вогнестійкості за допомогою табличних даних), так і на підставі експериментальних випробувань на вогнестійкість.

Протягом останнього часу в Україні була проведена значна робота з питань стандартизації методів визначення вогнестійкості практично для всіх видів будівельних конструкцій. Так, вимоги до методів випробувань будівельних конструкцій на вогнестійкість встановлені державним стандартом ДСТУ Б В.1.1–4–98*. В ньому враховані основні положення чинних нормативних документів, вимоги та рекомендації Міжнародного стандарту ISO 834-1:1999, Європейського стандарту EN 1363-1. Значним кроком вперед було прийняття ряду національних стандартів щодо методів випробувань будівельних конструкцій і виробів на вогнестійкість. В ДСТУ Б В.1.1-13:2007, ДСТУ Б В.1.1-14:2007, ДСТУ Б В-1.1-15.2007 і ДСТУ Б В.1.1-20:2008

приводяться методи випробувань на вогнестійкість балок, колон, перегородок та перекриттів відповідно. У ДСТУ Б В.1.1-19:2007 приведено метод визначення вогнестійкості несучих стін. ДСТУ Б В.1.1-17:2007 описує метод визначення вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів металевих конструкцій. Ці стандарти з деякими поправками і адаптаційними вимогами є відповідними європейським стандартам EN 1365 і ENV 13381-4:2002.

Сутність експериментального методу полягає у визначенні проміжку часу від початку впливу небезпечних чинників пожежі до настання одного з нормованих для конкретної конструкції граничних станів з вогнестійкості. Основним принципом, на якому заснований експериментальний метод – це створення у спеціальній випробувальній печі умов випробувань, що наближені до реальних умов пожежі у приміщенні, будівлі чи споруді [119].

Країни Європейського Союзу керуються спільними (майже тотожними) стандартами з визначення межі вогнестійкості будівельних конструкцій, проте в ряді випадків застосовуються методи випробувань, що істотно відрізняються між собою. При цьому, як показує практика, межі вогнестійкості вогнезахисних конструкцій з найбільш відомими вогнезахисними покриттями Protherm Steel (Italvis Protect Srl, Італія), Nullifire (Nullifire Limited, Великобританія), досліджені у випробувальних лабораторіях різних країн (Великобританія, Австралія, Фінляндія, Італія, Чехія, Болгарія), незалежно від стандартів відрізняються між собою в межах допустимої області відхилень. В Європі на даний час реалізувалася концепція з приведення усіх національних стандартів до єдиного європейського стандарту EN 1363-1. Підтвердженням цьому є поява нових стандартів BS EN 1363-1 (Великобританія), DIN EN 1363-1 (Німеччина), AF EN 1363-1 (Франція), які є технічно еквівалентними з визначення показників вогнезахисної ефективності засобів вогнезахисту. Такий підхід значно спрощує просування імпортованої продукції, процедуру сертифікації в країні-споживачеві, робить її більш прозорою і достовірною, а також сприяє практиці визнання відповідності товару.

В Україні є позитивний досвід з використання методів випробувань згідно ДСТУ Б В.1.1-17:2007 – аналогу європейського стандарту ENV 13381-4:2002 [120].

Експериментальні методи при визначенні меж вогнестійкості залізобетонних конструкцій були використані в [121–124].

В [121] представлена експериментальна експрес-оцінка залишкової міцності залізобетонних каркасних будівель після пожежі на основі неруйнівного випробування, що дозволяє прийняти швидке і досить надійне рішення, яке необхідне для дій рятувальників, працівників судово-медичної експертизи та структурної оцінки стану будівлі після пожежі. Недоліком експрес-методу є неможливість його застосування для окремих будівельних конструкцій.

В [122] основна увага дослідників була приділена дослідженню вогнестійкості залізобетонних колон в умовах випробувань при стандартному температурному режимі пожежі при стандартній пожежі протягом 60 та 120 хвилин і при навантаженні з двома різними коефіцієнтами завантаження (20 % і 40 % від розрахункового осьового навантаження колони). В результаті випробувань встановлено, що колони ніколи не відновлюють свою початкову міцність після впливу стандартного температурного режиму пожежі. Залишкова міцність колони на стиск зменшилась майже до 50 % і 30 % від допустимої температури навколишнього середовища для колон, які зазнали впливу 60 та 120 хвилин пожежі. Проте, увагу дослідників оминули питання поведінки вогнезахисених залізобетонних колон при теплових і механічних впливах.

В [123] приводяться результати експериментального визначення межі вогнестійкості залізобетонної балки при стандартному температурному режимі пожежі. За результатами експериментальних досліджень запропоновано використовувати метод еквіваленту часу, щоб змоделювати реальну пожежу з використанням результатів випробувань балки при стандартному температурному режимі пожежі. Проте поза увагою дослідників залишилися

питання використання методу для інших будівельних конструкцій і режимів пожежі.

В [124] проаналізовано руйнування залізобетонних колон після впливу високих температур за різних температурних режимів пожежі. Зроблено висновок, що при оцінюванні надійності залізобетонної колони необхідно враховувати реальний температурний режим пожежі. Але в роботі поряд з перевагами, в дослідженні не висвітлено питання оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних колон.

Експериментальний метод при визначенні меж вогнестійкості вогнезахищених і незахищених конструкцій був описаний в роботах [125–127].

В [125] наведені експериментальні та розрахункові дані щодо визначення температури вогнезахищених будівельних конструкцій в умовах вогневого впливу за стандартним режимом пожежі. Автори аналізують можливість використовувати зразки зменшених розмірів і іншої форми, ніж розміри і форми стандартизованих зразків для оцінювання вогнестійкості. Не зважаючи на практичну значимість таких результатів, невисвітленими залишилися питання впливу зовнішніх чинників на вогнестійкість вогнезахищених конструкцій.

У [126] розглядаються результати експериментальних випробувань вогнезахищених конструкцій, що спрямовані на дослідження теплових властивостей, співвідношення зміни температури та товщини покриття в умовах випробувань при стандартному температурному режимі або режимі пожежі, яка повільно розвивається. Однак, в роботі не представлено даних щодо поведінки вогнезахисних покриттів при більш жорстких режимах пожежі, наприклад вуглеводневої чи тунельної.

В [127] описуються експериментальні дослідження поведінки при підвищених температурах незахищених і вогнезахищених балок, що мають різні розміри і форму отворів. Експерименти показали, що результати випробувань на вогнестійкість вогнезахищених балок були суперечливими щодо їх поведінки при підвищених температурах, виду матеріалу

вогнезахисного покриття і його мінімальної товщини. Неможливість зняти вказані недоліки, накладають певні обмеження на використання тільки експериментальних досліджень з причини великої кількості випробувань для оцінювання вогнестійкості вогнезахищених конструкцій.

Таким чином, експериментальні методи оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій є найбільш точними. Проте, поряд з перевагами, такі методи мають і недоліки, що проявляються в складності виготовлення зразків, підготовки, доставки і проведення випробувань на вогнестійкість великогабаритних будівельних конструкцій. Це спричиняє значні матеріальні витрати на випробування у акредитованих лабораторіях, унеможливорює перенесення результатів випробувань на конструкції всіх типорозмірів та видів. Випробування потрібно проводити з дотриманням спеціальних умов на великих площах і воно пов'язане із забрудненням навколишнього середовища. До суттєвих недоліків слід віднести наявність істотних похибок (ідеалізації, опису, обчислень, інтерпретації), що обумовлено недосконалістю нагрівального і вимірювального обладнання, а також невідповідністю розмірів і умов закріплення зразків для випробування з розмірами і умовами закріплення реальних конструкцій. Вищезазначені недоліки породжують значні обмеження використання експериментальних методів оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій.

1.5.2 Розрахункові методи

Одним із найбільш поширених методів визначення вогнестійкості будівельних конструкцій є застосування Єврокодів та гармонізованих з ними національних стандартів України. Одним із пріоритетних напрямків Європейської політики є поступове наближення українського законодавства, норм і стандартів до відповідних документів Європейського Союзу. Розвиток нормативної бази в Україні здійснюється з використанням досвіду

Європейського Союзу (відносно гармонізації законодавства України в сфері будівництва і нормативної бази відносно проектування будівельних конструкцій, стандартів на будівельні вироби).

При розробці Єврокодів передбачалося, що демонстрація відповідності нормативним вимогам для альтернативних методів повинна проводитись за допомогою розрахунків, заснованих на експлуатаційних характеристиках матеріалів та елементів конструкцій.

У загальному випадку розрахунок будівельних конструкцій на вогнестійкість включає теплотехнічну та статичну частини. Теплотехнічна частина полягає в розрахунку полів температур у перерізі конструкції, що змінюються в часі при тепловому впливі пожежі [128–132].

В [128] представлена методика щодо оцінювання вогнестійкості залізобетонних перекриттів. Розвинуто методологію щодо застосування підходів до розрахунку меж вогнестійкості на основі методу кінцевих різниць. Запропоновані для врахування в методиці вимоги до матеріалів, граничних умов, розрахункових схем, сіткових моделей, а також критеріальна база щодо настання граничних станів. Однак, дана методика застосовується тільки для залізобетонних перекриттів, для стандартного температурного режиму пожежі і не поширюється на вогнезахиснені залізобетонні конструкції.

В [129] приведено результати визначення розрахунковими методами рівномірних та нерівномірних розподілів температури по перерізу сталеві балки, на яку опирається бетонна плита перекриття, для вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі незахищеної сталеві балки та сталеві балки, на поверхню якої нанесено вогнезахисну речовину. Розрахунки температури сталеві балки при її рівномірному розподілі були виконані із застосуванням комп'ютерної програми FRIEND, а розрахунки нерівномірних розподілів температури в поперечному перерізі сталеві балки виконані із застосуванням програми ANSYS FLUENT. ANSYS FLUENT дозволяє моделювати процеси теплообміну в трьохвимірній постановці з кращою, в порівнянні з FRIEND, візуалізацією. Проте програма ANSYS FLUENT, на

відміну від FRIEND, має більший час прорахунку температурного розподілу в конструкції.

В [130] проведено моделювання дослідження теплових властивостей залізобетонних конструкційних елементів з використанням пакету ABAQUS. Задавання конвективних і радіаційних граничних умов надало можливість отримати більш точні результати. Зменшення розбіжності між розрахунковими та експериментальними результатами спостерігалось при використанні теплофізичних характеристик згідно Eurocode2, який враховує емісію вологи. Однак, дослідниками не досліджувалося при моделюванні теплові процеси вогнезахисних залізобетонних конструкцій з теплофізичними характеристиками бетону та вогнезахисного покриття, знайдених розв'язанням обернених задач теплопровідності, що є більш точним підходом у порівнянні з використанням характеристик з Eurocode2.

В [131] розроблена модель оцінювання ймовірності втрати несучої здатності будівельної конструкції в результаті пожежі. Однак розроблена модель не дає відповіді на питання щодо її використання при довільних режимах пожежі.

В [132] наведені результати оцінювання вогнестійкості збірних залізобетонних балок-колон, які з'єднуються по торцям з залізобетонними плитами і поєднуються у збірну залізобетонну каркасну конструкцію. Для перевірки точності побудованої моделі використовувався тільки обчислювальний експеримент. Це накладає певні обмеження на використання моделі в каркасних конструкціях вогнезахисних залізобетонних конструкцій з обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів.

У [133] проведено скінченно-елементне моделювання для структурних характеристик тонких залізобетонних перекриттів підсилених сталевими вогнезахисними балками при впливі високих температур пожежі. Теплові властивості та поведінка різних реактивних вогнезахисних покриттів попередньо вивчалися шляхом експериментальних досліджень. Незважаючи на практичну значимість результатів, не в достатній мірі досліджені питання

застосування вогнезахищених конструкцій при впливі інших температурних режимів пожежі.

Статична частина розрахунку на вогнестійкість полягає у визначенні кінетики втрати конструкціями своєї несучої здатності внаслідок зміни механічних властивостей і горіння матеріалів, а також внаслідок розвитку додаткових зусиль при підвищенні температури [134–139].

В [134] проведено аналіз вимог стандартів до проведення випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій України, Білорусі та Європейського Союзу. Проведено порівняння результатів випробувань на вогнестійкість найбільш поширених залізобетонних багатопустотних плит з даними розрахунків. Проте, не розглядалися питання щодо випробувань на вогнестійкість вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій.

В [135] представлені результати теоретичних розрахунків вільнообпертої балки, підданої впливу стандартного температурного режиму пожежі за допомогою розробленої моделі, створеної в програмному комплексі ANSYS та у програмному забезпеченні OpenSEES. При цьому авторами не наводяться дані щодо розрахунків вогнестійкості конструкції з вогнезахистом та при інших обраних режимах пожежі, що накладає певні обмеження на використання розроблених моделей.

В [136] запропоновано методику оцінювання вогнестійкості залізобетонної плити перекриття. Розвинуто методологію застосування методів розрахунку меж вогнестійкості, заснованих на використанні методу скінчених різниць, на прикладі оцінки вогнестійкості залізобетонної плити перекриття. Розроблені вимоги до бази початкових даних щодо матеріалів, граничних умов, побудови розрахункових схем та сіткових моделей, а також критеріальна база щодо ідентифікації настання граничних станів. Однак, дана методика застосовується тільки для залізобетонної плити перекриття та тільки для стандартного температурного режиму пожежі.

В [137] розроблено методику апроксимації температурного поля в поперечному перерізі залізобетонного ригеля або балки. Запропоновано

алгоритм визначення температури у вузлових точках перерізу шляхом інтерполяції температур за температурними показниками у контрольних точках перерізу. Такий алгоритм заснований на наближенні ліній ізотерм еліптичними та параболічними апроксимаційними залежностями. Проте запропонована методика не застосована для вогнезахисних залізобетонних ригелів і балок та використовується тільки для стандартного температурного режиму пожежі.

В [138] наведені результати розробки методів верифікації результатів розрахунку меж вогнестійкості залізобетонних конструкцій уточненими методами на базі моделювання їх напружено-деформованого стану в умовах пожежі. Проте в роботі не розглядається теплотехнічний розрахунок залізобетонних конструкцій.

В [139] проведено аналіз руйнування залізобетонного моста внаслідок пожежі з використанням обчислювальної гідродинаміки і кінцево-елементних моделей. В роботі приводяться чисельні моделі для прогнозування межі вогнестійкості залізобетонних конструкцій моста внаслідок пожежі. Однак, в роботі не наводяться дані щодо підвищення меж вогнестійкості конструктивних елементів моста за допомогою використання вогнезахисних залізобетонних конструкцій із науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів.

В [140] авторами розроблено дві моделі балки за допомогою програм ANSYS та OpenSEES, які враховують постійне механічне навантаження та вплив температурного режиму пожежі, проте не враховують наявність систем вогнезахисту та їхній вплив на точність моделювання.

Автори у [141] пропонують використовувати при розрахунках температури вогнезахисних конструкцій при пожежі постійне значення коефіцієнту теплопровідності реактивного вогнезахисного покриття, так як це не впливає на точність розрахунків. Проте, як відомо, найбільша точність розрахунків саме при значенні коефіцієнту теплопровідності вогнезахисного покриття, який залежить від температури.

В [142] представлені результати випробування на вогнестійкість незахищених балок порівняно з простими та удосконаленими методами

розрахунку, наведеними в EN 1993-1-2. Результати показали різницю між експериментальними та розрахунковими значеннями температури, отриманими при аналізі FEM.

Розвиток методів розрахунку вогнестійкості конструкцій, особливо в частині розв'язання теплотехнічної задачі, стало можливим завдяки використанню сучасного комп'ютерного програмного забезпечення.

Таким чином, використання розрахункових методів оцінювання вогнестійкості незахищених та вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій, порівняно з експериментальним, має ряд переваг, що полягають у можливості проведення розрахунків без великих матеріальних затрат, хоча і повинні бути сертифіковані програмні продукти, які коштують дорого, та висококласні спеціалісти, що зможуть правильно і обґрунтовано задавати параметри моделі теплового стану вогнезахищених будівельних конструкцій. Більшість розрахункових методів засновано на грубих допущеннях будівельної механіки, що негативно позначається на точності отриманих результатів з достатньо великою похибкою при розрахунках, що може сягати 25–30%. Як наслідок, неточності у початкових, граничних умовах та неточність у використанні математичних та моделей теплових процесів, що відбуваються у вогнезахищених конструкціях при тепловому впливі пожежі, можуть призвести до помилкового оцінювання вогнестійкості вогнезахищених будівельних конструкцій, а відтак до прорахунків при проектуванні будівель та споруд з таких конструкцій.

1.5.3 Розрахунково-експериментальні методи

Розрахунково-експериментальні методи займають певне місце серед основних методів дослідження залізобетонних будівельних конструкцій на вогнестійкість (рис. 1.4). Основою методів є математична модель фізичного процесу, а експеримент (експериментальні дані) є допоміжною складовою, необхідною для забезпечення адекватності обраної моделі процесу.



Рис. 1.4 Структурно-логічна схема розрахунково-експериментального методу

Розрахунково-експериментальні методи є способом аналізу, оптимізації та прогнозування процесів тепломасообміну, на основі комп'ютерної або розрахункової моделі, адекватність якої забезпечується шляхом параметричної або структурної ідентифікації за допомогою експериментальної інформації про процес (випробування) та розв'язання обернених задач теплопровідності.

Таким чином, відповідно до приведеного вище визначення, основними складовими розрахунково-експериментального методу (рис. 1.4) є:

1. Розрахункова (комп'ютерна реалізація розробленої математичної моделі) модель фізичного процесу.
2. Експериментальні дані, необхідні для забезпечення адекватності моделі процесу.
3. Ідентифікація параметрів обраної моделі процесу з метою забезпечення її адекватності.
4. Адекватна модель, яка в подальшому буде використана для вирішення поставлених завдань аналізу, оптимізації або прогнозування досліджуваного фізичного процесу.

Об'єкт і математична модель, яка описує основні фізичні процеси, що відбуваються в об'єкті, дозволяють отримувати відповідно експериментальну характеристику (T_E) і розраховувати модельну характеристику (T_M). У свою чергу ці характеристики залежать від ряду вхідних параметрів P фізичного або технологічного характеру.

У нашому випадку до таких параметрів відносяться теплофізичні характеристики сталі, бетону і вогнезахисного покриття – коефіцієнт теплопровідності і питома теплоємність. Параметри P , як правило, невідомі, і їх визначення можливе за допомогою розв'язання обернених задач теплопровідності за даними експериментальних вимірювань T_E . Розв'язання обернених задач теплопровідності зводиться до пошуку таких значень P , для яких розрахункові (T_M) та експериментальні (T_E) значення деяких характеристик (у нашому випадку теплових) стають близькими один до одного.

Критерієм близькості цих характеристик найбільш часто є величина

$$F(P) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (T_{M,j} - T_{E,j})^2}{m}} \approx \delta, \quad (1.4)$$

де m – число експериментальних вимірювань, що використовуються для розв'язання оберненої задачі; δ – середньоквадратична помилка вимірювання.

Отримані розв'язанням обернених задач параметри P , процесу, що досліджується, використовуються на основі тієї ж моделі для вирішення основних інженерних задач аналізу – оптимізації параметрів або прогнозу. У нашому випадку – для отримання характеристики вогнезахисної здатності покриття. Розв'язання ж обернених задач є допоміжною процедурою, направленою забезпечити адекватність обраної моделі фізичним процесам, що розглядаються.

Таким чином, структурно-логічна схема розрахунково-експериментального методу складається з наступних етапів:

1. Побудова фізичних та вибір математичних моделей теплового стану будівельних конструкцій, що досліджуються.

2. Проведення випробувань (експериментів), що зводяться до вимірювання температур на поверхні та по перерізу будівельних конструкцій, що випробовуються, та у вогневій печі.

3. Ідентифікація за даними випробувань (експерименту) теплофізичних характеристик моделі на основі розв'язання обернених задач теплопровідності.

4. Використання теплофізичних характеристик і моделі для визначення характеристик вогнезахисної здатності покриттів залізобетонних будівельних конструкцій за результатами випробувань на вогнестійкість.

Розглянутий вище підхід можна визначити як сукупність моделей, обладнання, методик і методів, що в свою чергу створює методологію даного дослідження.

Розрахунково-експериментальний метод має експериментальну та розрахункову частину. Експериментальна включає в себе проведення випробувань на вогнестійкість. Розрахункова включає вибір математичної та комп'ютерної моделей фізичних процесів, які відбуваються в досліджуваних об'єктах, вибір процедур визначення параметрів моделі шляхом розв'язання обернених задач і визначення характеристики вогнезахисної здатності покриттів будівельних конструкцій шляхом розв'язання ряду прямих задач.

Як видно із проведеного аналізу, головна частина наукових публікацій носять постановочний (представницький) характер. Норми встановлюють лише мінімальний рівень безпечної експлуатації та довговічності будівельних конструкцій. Забезпечення безаварійної експлуатації споруджуваних і існуючих будівель та споруд передбачає вміння прогнозувати поведінку їх будівельних конструкцій при виникненні і впливові високих температур пожежі.

1.6 Випробувальне обладнання для дослідження вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій

До випробувального обладнання відноситься:

- випробувальні печі;
- обладнання для встановлення зразка в печі;
- засоби вимірювальної техніки;
- обладнання, що дозволяє проводити фото- та відеозйомки.

Вертикальні випробувальні печі використовуються для випробування стін, перегородок, конструкцій зі склінням, які виконані з бетону, залізобетону, цегли, а також багатошарових конструкцій, що містять шари металу, гіпсокартону, дерева, пінополістиролу, дверей, воріт, вікон на вогнестійкість (рис. 1.5).



Рис. 1.5 Загальний вигляд вертикальної випробувальної печі

Горизонтальні випробувальні печі використовуються для випробування плитних і балочних горизонтальних конструкцій на вогнестійкість. За допомогою даних печей випробовують плити перекриття і покриття, балки, сходи, підвісні стелі (рис. 1.6).

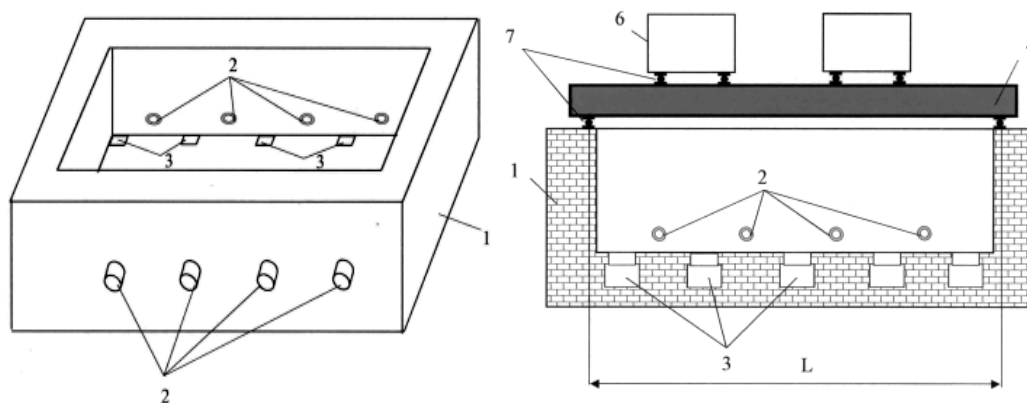


Рис. 1.6 Схема горизонтальної печі: 1 – корпус печі; 2 – пальники; 3 – канали для відведення відпрацьованих газів; 4 – зразок, який випробовується; 5 – термопари в печі; 6 – навантаження на зразок; 7 – шарнірні опори

Спеціальні випробувальні печі використовуються для теплофізичних випробувань матеріалів і визначення межі вогнестійкості фрагментів конструкцій і виробів в умовах пожежі. У цих печах випробовують фрагменти колон, фрагменти сміттєпроводів; кабельні проходки (рис. 1.7).



а

б

Рис. 1.7 Загальний вигляд спеціальних випробувальних печей: *а* – ТОВ «Тест»; *б* – ТОВ «Донстройтест»

Лабораторні печі використовуються для проведення випробувань малорозмірних (зменшених) зразків будівельних конструкцій або

вогнезахисних матеріалів з метою визначення їх теплофізичних характеристик, прогнозу межі вогнестійкості реальних конструкцій, порівняльної характеристики різних матеріалів, контролю якості продукції, що випускається і проведення пошукових експериментальних досліджень властивостей будівельних і вогнезахисних матеріалів [143].

Аналіз печей для натурних вогневих випробувань будівельних конструкцій показав, що:

– використання печей для натурних випробувань, є кращим у зв'язку з тим, що вони дозволяють максимальним чином врахувати всі особливості досліджуваного елемента і умов, що виникають під час пожежі;

– велика кількість різновидів і типорозмірів печей обумовлено їх недосконалістю і можливістю випробовувати тільки зразки певних конструкцій і розмірів [144];

– проведення випробувань на даних печах має велику трудомісткість і високу вартість, також вимагає спеціальних умов, великих площ і призводить до забруднення навколишнього середовища [145];

– в деяких випадках існуючі печі не можуть забезпечити проведення натурних випробувань через те, що конструкції є дуже складними і громіздкими [146];

– випробування будівельних конструкцій в натурних печах здійснюється в умовах стандартного температурного режиму пожежі, що не враховує особливості реальних пожеж .

Таким чином, для проведення випробувань на вогнестійкість використовується різноманітне обладнання та прилади, які для повної відтворюваності результатів експерименту повинні мати певну точність, бути метрологічно повірені, вогневі печі мають бути атестовані.

1.7 Аналіз умов проведення досліджень залізобетонних будівельних конструкцій

1.7.1 Розрахункові температурні сценарії дослідження залізобетонних будівельних конструкцій на вогнестійкість

Одним з основних критеріїв для розрахунку вогнестійкості будь-якої будівельної конструкції є визначення температурно-часової залежності розвитку пожежі, яка повинна відноситися тільки до одного протипожежного відсіку будівлі, якщо в проектному сценарії розвитку пожежі не вказано інше. Розрізняють номінальні і параметричні температурні режими.

Методи моделювання реальної (розрахункової, параметричної) пожежі можуть бути застосовані під час розробки заходів щодо протипожежного захисту будівель та споруд.

Номінальні температурно-часові залежності – це загальноприйняті режими розвитку пожежі, які адаптовані для відтворюваності таких досліджень, класифікації та підтвердження вогнестійкості різних будівельних матеріалів, виробів і конструкцій.

В [147] встановлюються такі номінальні температурні режими: стандартний температурний режим розвитку пожежі, температурний режим зовнішньої пожежі та режим вуглеводневої пожежі (НС).

До загальноприйнятих номінальних режимів розвитку пожежі також відносяться: температурний режим пожежі, яка повільно розвивається, модифікована температурно-часова залежність розвитку вуглеводневої пожежі (НСМ), режими розвитку пожежі в тунелях (криві залежності RWS, RABT ZTV і ін.). Криві залежності деяких номінальних режимів розвитку пожежі представлені на рис. 1.8.

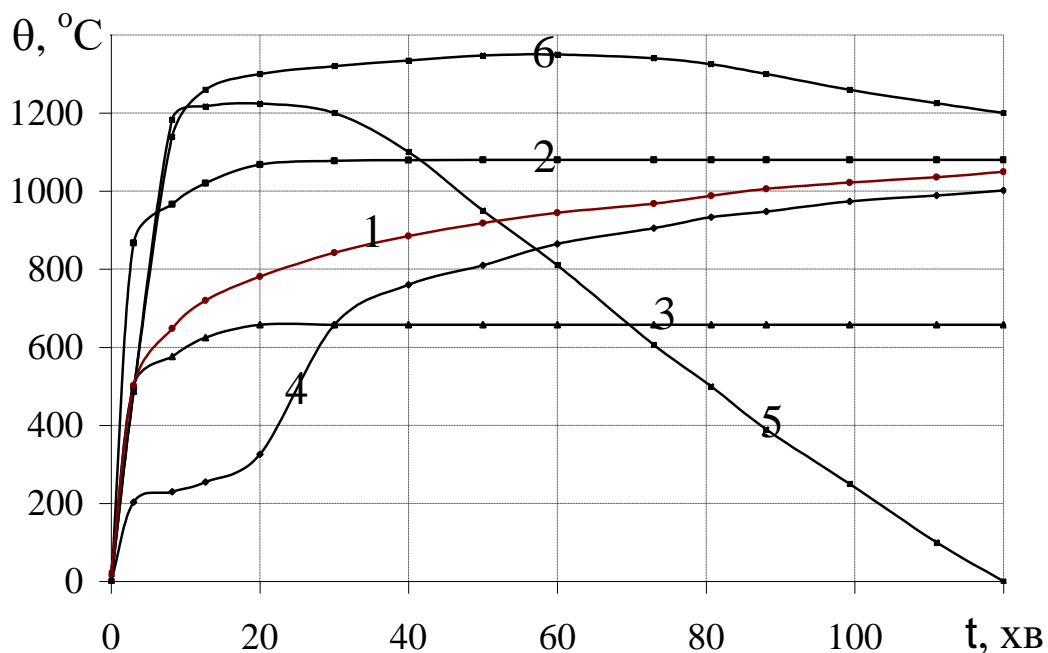


Рис. 1.8 Залежність зміни температури від тривалості вогневого впливу при різних темпах нагріву: 1 – стандартна температурна крива по ISO 834; 2 – вуглеводнева крива по EN 1363-2:1999; 3 – мінімізована єдина стандартна температурна крива по ISO 834; 4 – крива зовнішньої пожежі по EN 1363-2:1999; 5 – тунельна крива по стандартам Німеччини (RABT); 6 – тунельна крива по стандартам Нідерландів (RWS)

Стандартна пожежа – температурно-часова залежність, визначена в ISO 834, для представлення сценарію повністю розвинутої пожежі в протипожежному відсіку. Стандартний температурний режим є усередненою залежністю і відповідає розвитку пожежі в приміщеннях житлових і громадських будівель. При цьому допускається, що пожежне навантаження еквівалентне 50 кг/м^2 деревини. Іноді такий температурний режим називають «целюлозною кривою».

Однак, сьогодні випробування з визначення межі вогнестійкості конструкцій можливо проводити й за стандартизованими температурними режимами, які моделюють стадію розвинутої пожежі за іншими сценаріями умовної пожежі. Ці режими визначені за тими ж принципами, що і «стандартний» температурний режим, та регламентовані відповідними

стандартами [148]. Такі режими називають «додатковими та альтернативними» стандартними температурними режимами. Введення додаткових стандартизованих температурних режимів дозволяє розширити можливості оцінювання поведінки будівельних конструкцій в умовах, які наближені до реальних умов пожежі.

Горіння різних вуглеводневих палив (легкозаймистих і горючих) характеризується швидким підвищенням температури до 1100 °С. Такі пожежі можливі на об'єктах нафтогазового і нафтохімічного комплексів. В цьому випадку для оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій використовується «вуглеводнева крива» [149–156].

В [149] наводяться результати випробувань на вогнестійкість вогнезахищених конструкцій за допомогою вогнезахисного покриття на основі акрилової смоли з типовою комбінацією добавок, а саме: поліфосфат амонію, пентаеритрит і розширюваний графіт. Одним із основних результатів цієї роботи є висновок, що більш високі значення швидкості тепловиділення і більша кількість матеріалу, який бере участь в процесі піролізу в одиницю часу, призводять до швидкого підвищення температури вогнезахищеної конструкції. Однак, авторами не наводяться дані щодо впливу температурних режимів пожежі, теплофізичних характеристик та товщини покриття на вогнестійкість вогнезахищених конструкцій.

Метою [150] є розробка процедури кількісної оцінки структурних критеріїв, необхідних для ефективного і дієвого управління ризиками катастрофічних структурних руйнувань через вибухи і пожежі на морських нафтогазових об'єктах. У роботі демонструється застосування розробленої процедури з акцентом на визначення вибухових і пожежних розрахункових навантажень. Проте, в роботі не наведено дані щодо оцінювання вогнестійкості вогнезахищених конструкцій морських нафтогазових об'єктів при довільних режимах пожежі.

В [151] описано комбінований вплив на колону вибуху, який викликає деформацію і в подальшому пожежу при оцінюванні ризиків вибуху

вуглеводнів та пожеж на морських установках. Однак авторами не враховано вплив вогнезахисту на оцінювання ризиків вибуху та пожеж на морських установках.

В [152] представлено результати проєктування будівельних конструкцій нафтогазового комплексу при особливому навантаженні – пожежі при вуглеводневному режимі пожежі. Представлено детальний огляд міжнародних, європейських та американських стандартів для визначення меж вогнестійкості при моделюванні горіння вуглеводнів. Слід підкреслити, що вимоги до меж вогнестійкості в умовах вуглеводневої пожежі для деяких будівель і споруд відсутні, тому випробування будівельних конструкцій без відповідних розрахунків зайві і економічно недоцільні. Пропонується розробка галузевих стандартів для підприємств нафтогазової галузі з переліком параметрів вогнезахисного покриття для захисту будівельних конструкцій в умовах вуглеводневої пожежі. Однак, поза увагою дослідників залишилися питання знаходження теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів для їх використання в умовах температурного впливу вуглеводневої пожежі.

Автори [153] наводять результати досліджень з оцінки небезпеки вуглеводневої пожежі і подальшого вибуху, що може призвести до серйозних руйнувань будівельних конструкцій, аж до руйнування споруди в цілому. Під час термічного аналізу використовували моделювання вогню та тепла (FANTS) та статичне навантаження з використанням граничної міцності. Проте поза увагою авторів залишилися питання оцінювання вогнестійкості вогнезахисних конструкцій морської платформи.

В [154] моделювали вуглеводневі реактивні пожежі за допомогою CFD-аналізу, використовуючи рівняння Рейнольдса у поєднанні з моделлю турбулентності. Отримані в результаті моделювання значення температури показали задовільну збіжність з експериментальними результатами, отриманими за допомогою інфрачервоної термографії. Також були проаналізовані значення загального теплового потоку, що вказує на деякі обмеження моделі. Проте, поза увагою дослідників залишилися питання

використання теплофізичних характеристик матеріалу конструкцій та вогнезахисного покриття, визначених розв'язанням обернених задач теплопровідності за даними результатів випробувань конструкцій на вогнестійкість.

В [155] розроблено методику для моделювання вибухів вуглеводнів і пожеж за допомогою обчислювальної гідродинаміки (CFD). Результати дослідження є частиною фази спільного галузевого проекту по вибухозахисту в плавучих системах видобутку, зберігання і розвантаження нафти. Проте, результати дослідження не мають даних щодо поведінки вогнезахисних реактивними вогнезахисними покриттями конструкцій при горінні вуглеводнів.

В [156] розроблені математичні моделі за допомогою методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) для прогнозування поведінки загорянь вуглеводневих покладів, проте вони не враховують поведінки вогнезахисних будівельних конструкцій в умовах впливу високих температур пожеж.

Таким чином, розроблені різні підходи з різноманітними припущеннями і спрощеннями та з урахуванням відповідних явищ. Однак відхилення в прогнозах експериментально визначених параметрів, таких як профілі температури, висота полум'я і радіаційний тепловий потік, реалізованими моделями все ще високі. Тому реалізація цих моделей для прогнозування явищ горіння і поведінки полум'я для різних сценаріїв обмежена.

Температурний режим вуглеводневої пожежі відноситься до жорсткіших режимів, ніж режим стандартного температурного режиму пожежі. Даний режим необхідно використовувати при визначенні меж вогнестійкості будівельних конструкцій, що застосовуються на об'єктах нафтової промисловості, температура горіння яких зростає значно швидше і має великі значення, ніж при горінні будь-яких інших будівельних і облицювальних матеріалів.

Інший можливий вид горіння – пожежа в тунелі [157]. За цих умов, коли відвід тепла від осередку ускладнений, створюється інтенсивний

температурний режим – «тунельна крива». Температура пожежі може сягати 1200 °C і вище, вже через 5–10 хв.

У Європейському Союзі для моделювання пожеж в тунельних спорудах використовуються температурні режими, що відрізняються від стандартного температурного режиму, що застосовується для визначення вогнестійкості конструкцій звичайних будівель та споруд. Для цих температурних режимів характерний більш швидкий ріст температури, а також наявність ділянки спаду температури. З огляду на великі габарити, складну структуру і просторову форму будівельних конструкцій підземних споруд даного типу, експериментальне визначення їх фактичних меж вогнестійкості пов'язане з не виправдано великими витратами.

В основу «тунельної кривої» покладено сценарій розвитку пожежі при горінні автомобілів. Так, в Німеччині спочатку, вимоги до тунелів містилися у Вказівках по облаштуванню та експлуатації автомобільних тунелів (RABT), потім температурний режим для тунелів був включений в ZVT Tunnel [158].

У Нідерландах температурна крива RWS використовується для оцінки теплових і механічних властивостей вогнезахисних покриттів тунелів, в яких дозволено транспортування небезпечних вантажів. Ця крива характеризується швидким підвищенням температури до 1200 °C в перші хвилини і подальшим повільнішим її наростанням до 1350 °C.

Температурний режим зовнішньої пожежі створює умови менш жорсткі, ніж при випробуваннях при стандартному температурному режимі. Дану температурно-часову залежність використовують при визначенні межі вогнестійкості зовнішніх стін будівель.

На даний час вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій і їх елементів нормується і визначається відповідно до стандартного температурного режиму пожежі, що не завжди задовольняє сучасним вимогам пожежної безпеки щодо захисту будівель і споруд.

Поведінка таких конструкцій, захищених вогнезахисними покриттями при їх випробуваннях в умовах інших температурних режимів до теперішнього часу

досліджена недостатньо. Відомі випадки, коли при низьких темпах нагріву реактивні покриття не повністю спучуються, і таким чином не виконують своєї функції. Існуючі методи не дозволяють з необхідною точністю визначати вогнестійкість таких конструкцій в умовах пожежі, відмінного від стандартного.

Дослідження вогнезахисних властивостей покриттів захищених залізобетонних конструкціях при їх випробуваннях в умовах альтернативних температурних режимів пожежі розкрито в [159–162]. Проте, в зазначених дослідженнях недостатньо вивчено питання поведінки конструкцій для усіх можливих температурних режимів, наприклад режиму вуглеводневої пожежі.

У [159] розглядаються питання математичного моделювання вогнестійкості несучих конструкцій машинних залів електростанцій за умов температурного режиму горіння водню, який є ще більш жорсткішим режимом пожежі на відміну від температурного режиму вуглеводневої пожежі. Проте відсутні достовірні дані щодо використання розроблених моделей для вогнезахисних конструкцій машинних залів електростанцій.

У [160] розглядаються питання впливу на значення межі вогнестійкості залізобетонних опор тунельних споруд температурних режимів вуглеводневої пожежі та режимів пожежі в тунелях за стандартами Німеччини (RABT) та Нідерландів (RWS), проте самих експериментальних випробувань зазначених будівельних конструкцій для таких режимів проведено не було.

У [161, 162] науково обґрунтовано градієнтно-температурний критерій для розрахунку вогнестійкості елементів залізобетонних конструкцій від впливу високоінтенсивних конвективно-радіаційних потоків при великомасштабному горінні вуглеводнів для різних сценаріїв розвитку пожежі на нафтохімічних підприємствах: вогневої кулі, пожежі розлиття, факельного горіння, пожежі-спалаху. Однак не приводяться дані щодо розрахунку вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій для різних сценаріїв розвитку пожежі.

Таким чином, при оцінюванні вогнестійкості розглядають сценарії реальної або умовної пожежі. Для сценаріїв умовної пожежі застосовують номінальні температурні режими, наприклад, стандартний температурний режим. За результатами оцінювання, проведеного за номінальними температурними режимами, будівельні конструкції класифікують за вогнестійкістю. У разі застосування вогнезахисних матеріалів, класифікація поширюється на захищену конструкцію, яка містить ці матеріали, але не на самі вогнезахисні матеріали [163–168].

У [163] описана методологія для спрощення процедури випробувань, що базується на використанні розрахункових методів оцінювання вогнестійкості вогнезахисних конструкцій (балок). Результати показують, що запропонований підхід, заснований на моделюванні поведінки вогнезахисного покриття з використанням еквівалентної теплопровідності, може бути використаний для кількісної оцінки вогнезахисної здатності покриття. Проте, дослідниками не надано інформації щодо використання інших параметрів вогнезахисного покриття (товщина, теплоємність) для моделювання впливу температурних режимів пожежі.

В [164] представлені експериментальні дослідження теплової поведінки вогнезахисних будівельних конструкцій в умовах реальної пожежі. На відміну від стандартного температурного режиму пожежі, який передбачає швидке і безперервне підвищення температури, представлена реальна модель пожежі (фаза розвитку, повністю розвинена пожежа, фаза охолодження). Проте теплофізичні характеристики покриття, такі як питома теплоємність, коефіцієнт теплопровідності і густина, ще не досліджені детально, особливо для сценаріїв реальної пожежі з різними швидкостями нагрівання та охолодження.

В [165] проведені експериментальні і чисельні дослідження вогнезахисних властивостей покриття в умовах впливу реальної пожежі. На основі власних лабораторних випробувань розроблена удосконалена чисельна модель для моделювання характеристик досліджуваного покриття, яка включає теплофізичні характеристики матеріалу: теплопровідність і теплоємність.

Однак теплофізичні характеристики автори пропонують використовувати як постійні значення, хоча застосування таких характеристик, залежних від температури, є більш точнішим підходом і дозволяє підвищити точність розрахунків.

В [166] розглянуто підходи щодо підвищення вогнестійкості залізобетонних конструкцій за допомогою використання поліпропіленового мікрОВОЛОКНА. Показано, що поліпропіленове мікрОВОЛОКНО може повністю запобігти вибуховому руйнуванню бетону. Проте, поза увагою дослідників залишилися питання підвищення вогнестійкості залізобетонних конструкцій з використанням вогнезахисних покриттів та розрахунок вогнестійкості будівлі в цілому з використанням сучасних програмних комплексів при інших температурних режимах пожежі, відмінних від стандартного.

У [167] представлений імовірнісний термомеханічний аналіз за допомогою методу кінцевих елементів. Представлена методологія дозволяє досліджувати вплив зміни теплових властивостей бетону на пожежну безпеку конструкцій. В роботі враховані невизначеності, які пов'язані з тепловими та механічними властивостями бетону, температурами, описаними стандартною температурною кривою пожежі. Однак, залишились не розглянуті в достатній мірі питання щодо розрахунків вогнезахисних залізобетонних конструкцій та не приводяться дані щодо використання покриттів при інших довільних режимах пожежі.

У [168] наведено результати моделювання випробувань на вогнестійкість бетонних та залізобетонних конструкцій. Авторами наведено сучасний експериментальний підхід до вивчення вогнестійкості різних компонентів конструкції, використовуючи чисельне моделювання полів температури та теплового потоку. Проте, не визначено, як даний підхід можна застосовувати для вогнезахисних залізобетонних конструкцій та будівель із конструкцій з урахуванням обґрунтованих параметрів вогнезахисних покриттів при довільних температурних режимах пожежі.

Таким чином, вогнезахиснені залізобетонні конструкції при їх використанні в будівлях та спорудах різного функціонального призначення володіють різною межею вогнестійкості, що забезпечується використанням вогнезахисних речовин з різними властивостями та характеристиками. На параметри утворених вогнезахисних покриттів впливають умови, при яких відбуваються випробування на вогнестійкість вогнезахисних будівельних конструкцій. Тому при проектуванні будівель та споруд з використанням вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій потрібно враховувати впливи температурних режимів пожеж на значення меж вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій.

1.7.2 Вплив кліматичних факторів на вогнезахисну здатність покриттів вогнезахисних будівельних конструкцій

Строк придатності вогнезахисного покриття – строк, упродовж якого вогнезахисна речовина здатна забезпечити вогнезахист після її нанесення.

Для кожного вогнезахисного засобу розробляється регламент, який повинен містити технічні та фізико-хімічні характеристики вогнезахисного засобу у тому числі умови експлуатації (вологість та температуру приміщень тощо) та строк придатності вогнезахисного покриття, який визначається відповідно до результатів кліматичних або періодичних випробувань.

Випробування призначені для визначення здатності вогнезахисних покриттів для будівельних конструкцій зберігати свої вогнезахисні та експлуатаційні властивості упродовж терміну експлуатації, який встановлено виробником цієї продукції.

Методика випробувань включає в себе метод прискореного старіння та метод довготривалого зберігання. Суть методу прискореного старіння полягає у моделюванні процесів старіння вогнезахисних покриттів штучним шляхом та визначенні оціночних показників до і після «прискореного старіння». Суть довготривалого зберігання полягає у закладці зразків на термін, який

зазначений у нормативній документації на дані засоби вогнезахисту, і періодичній перевірці оціночних показників вогнезахисних покриттів.

Відповідно до методики до оціночних показників відносяться: товщина вогнезахисного покриття, вогнезахисна ефективність, коефіцієнт спучування, адгезія, міцність при ударі, висолоутворення, волого поглинання, корозія на металі під покриттям.

Зразки випробовуються до та після проведення прискороного старіння. Цикли імітації старіння вогнезахисних покриттів наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Цикли імітації старіння вогнезахисних покриттів [169]

Назва режиму	Показники режиму для утримування покриття	
	полімерного	неорганічного
Перемінна температура і підвищена вологість	<p>– 4 год. в камері вологи при температурі плюс $(40+2)$ °C і відносній вологості $(97+3)$ %;</p> <p>– 2 год. остигання в камері вологості;</p> <p>– 3 год. витримування в камері холоду при температурі повітря мінус $(45+2)$ °C;</p> <p>– відносна вологість не регламентується</p>	<p>– 41 год насичення покриття в воді (розчинні солі) при температурі 15–30 °C;</p> <p>– протягом 2 год. зниження температури від –10 °C до –50 °C;</p> <p>– 2 год витримування при температурі –50 °C;</p> <p>– протягом 2 год. підйом температури від –50 °C до –10 °C;</p> <p>– протягом 1 год. підйом температури від –10 °C до $(50+2)$ °C</p>

Продовження таблиці 1.1		
Агресивна газова середа	– 2 год. витримування покриття в камері сірчаного газу при температурі (40+2) °С і відносній вологості (97+3) %; – склад SO ₂ мг/м ² повітря	– 2 год. витримування покриття в камері сірчаного газу при температурі (40+2) °С і відносній вологості (97+3) %; – склад SO ₂ мг/м ² повітря
Сонячне випромінювання	– 7 год. витримування в камері ИП-1-3 при температурі 15–30 °С; – режим зрошення: зрошення 3 хв. – перерва 57 хв.	–
Витримування в умовах лабораторного приміщення	– 6 год. при температурі повітря 15–30 °С і відносній вологості не більше 80 %	–

Стандарт [169] розповсюджується на вогнезахисні речовини для деревини, матеріалів з деревини, тканини, кабельні вироби та сталеві конструкції та встановлює загальні технічні вимоги та методи випробування таких засобів.

Для просочувальних засобів встановлено метод визначення збереження вогнезахисної ефективності просочувальних засобів для деревини та показників міцності вогнезахисної деревини. Сутність методу полягає у визначенні вогнезахисної ефективності засобів та показників міцності деревини до та після прискореного старіння. Для випробування готують зразки в подвійній кількості.

Для лаків, красок і штукатурок встановлено метод визначення збереження вогнезахисної ефективності і адгезії покриття вогнезахисних лаків, красок. Сутність методу полягає в збереженні вогнезахисної ефективності і адгезії покриття до та після прискореного старіння. Для випробувань вогнезахисних покриттів для металу готують зразки у подвійній кількості згідно [170] (для

покриттів товщиною більше 0,2 мм) або [171] (для покриттів товщиною менше 0,2 мм), а також готують не менше 4 зразків металевих пластин, розмірами 210×210×2 мм. На одну поверхню зразка наносять вогнезахисну речовину у відповідності з технічною документацією на конкретний вид вогнезахисного засобу. Випробування проводять з визначення вогнезахисної ефективності відповідно до вимог [169] та адгезії відповідно до [169] (для покриттів товщиною більше 0,2 мм) або [170] (для покриттів товщиною менше 0,2 мм). Для перевірки на поширення полум'я та термічної стійкості вогнезахисних лаків і красок по кабельній продукції готують зразки в подвійній кількості, а також готують два зразки довжиною 200 ± 5 мм і діаметром від 35 мм до 60 мм з нанесеним засобом згідно з технічною документацією на конкретний засіб.

8 циклів прирівнюють 1 року експлуатації.

В країнах Європейського Союзу чинними є ETAG 000 та ETAG 018 [172–175], які поширюються на вогнезахисні засоби, що встановлюють методи оцінки терміну служби вогнезахисних засобів. Встановлено, що залежно від умов навколишнього середовища, за яких будуть експлуатуватися вироби після нанесення вогнезахисної речовини, розрізняють категорії, описані нижче.

Тип X – вогнезахисні покриття, призначені для використання за будь-яких умов (усередині приміщень, з частковим впливом зовнішнього середовища, з повним впливом зовнішнього середовища).

Цикли повинні проводитись без перерви. 1 цикл дорівнює 5 рокам експлуатації. Всього: 35 діб.

Тип Y – вогнезахисні покриття, призначені для використання усередині приміщень або з частковим впливом зовнішнього середовища. Частковий вплив включає температури нижче 0 °C, але не включає впливу дощу і передбачає обмежений вплив ультрафіолетового випромінювання (потужність ультрафіолетового випромінювання не оцінюють).

Цикли повинні проводитись без перерви. 1 цикл дорівнює 5 рокам експлуатації. Всього: 7 діб.

Тип Z1 – вогнезахисні покриття, призначені для використання усередині приміщень (за винятком тих, які призначено для експлуатації за температур нижче 0 °С) високою вологістю повітря.

Цикли повинні проводитись без перерви. 10 циклів дорівнює 5 рокам експлуатації. Всього: 24 год.

Тип Z2 – вогнезахисні покриття, призначені для використання усередині приміщень (за винятком тих, які призначено для експлуатації за температур нижче 0 °С) без впливу підвищеної вологості, які віднесені до класу Z1.

Цикли повинні проводитись без перерви. 10 циклів прирівнюють 5 рокам експлуатації. Всього: 24 год. 10 циклів дорівнює 5 рокам експлуатації.

Випробування з визначення строку служби вогнезахисних засобів для вогнезахисних конструкцій проводяться за показниками корозійної стійкості та вогнезахисної ефективності. Термін служби визначається шляхом порівняння показників якості зразків, які не піддавали впливу, з показниками якості зразків, які піддавалися штучному старінню. Результат випробування вважається позитивним, якщо середній проміжок часу протягом якого досягається критична для сталі температура (500 °С), визначена під час проведення випробувань з визначення терміну служби, перевищує 85 % від середнього значення, отриманих під час початкових випробувань. З метою усунення впливу, зумовленого неоднаковістю товщини покриття, співвідношення між його товщиною і значенням температури можна вважати лінійним.

За результатами аналізу нормативних документів з визначення строку придатності можна зробити такі висновки:

1. Основними показниками визначення строку придатності вогнезахисних засобів є показники вогнезахисної ефективності вогнезахисних засобів.

2. За результатами аналізу нормативних документів та літературних джерел встановлено, що для переважної більшості вогнезахисних покриттів характерні такі умови експлуатації (категорії розміщення):

– на відкритому майданчику;

- під навісом, в приміщенні, яке не опалюється;
- в сухому приміщенні, яке опалюється.

3. В нормативних документах країн Європейського Союзу встановлені різні методи визначення показників вогнезахисної ефективності вогнезахисних засобів.

Для правильного вибору методики випробувань при проведенні прискорених випробувань необхідно вибрати умови експлуатації вогнезахисного покриття. На теперішній час в Україні методи прискорених випробувань на стійкість до дії кліматичних факторів наведені в [176].

Аналіз праць вчених [177–185] та регламентів з вогнезахисту, розроблених відповідно до нормативних актів з пожежної безпеки, дає можливість визначити сферу застосування вогнезахисних покриттів. Встановлено, що більшість вогнезахисних покриттів використовується в сухому приміщенні, яке опалюється або під навісом, в приміщенні, яке не опалюється.

В [177] проведено дослідження з визначення впливу кліматичних факторів (ультрафіолетового випромінювання, вологості, температури і агресивного середовища) на вогнезахисну здатність реактивного вогнезахисного покриття на основі епоксидної смоли. Результати показали незначне зниження вогнезахисних властивостей досліджуваних покриттів після кліматичного впливу. Проте в роботі не показано впливу теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття на його вогнезахисні властивості після такого впливу.

В [178-179] описано вогнезахисні покриття з підвищеними експлуатаційними характеристиками покриття (кратність спучування, еластичність, густина, однорідність коксового шару). Однак поза увагою дослідників залишилися питання роботи вогнезахисного покриття після впливу на нього кліматичних факторів.

В [180] представлено способи захисту реактивних вогнезахисних покриттів від впливу атмосферних умов та їх вплив на коефіцієнт спучування. Встановлено зниження вогнезахисних властивостей під впливом атмосферних умов в результаті вимивання компонентів, що викликають утворення спученого

шару напівкоксу. Зроблено висновок, що розробка в області реактивних вогнезахисних речовин включає в себе не тільки процес покращення теплоізоляції і стабільності обугленого шару пінококсу, але і покращення вогнезахисних властивостей покриттів при впливі різних кліматичних факторів.

В [181] представлено експериментальні дослідження реактивних вогнезахисних покриттів після різних циклів випробувань за методикою пришвидшеного гідротермального старіння та впливу пожежі. Результати показали погіршення характеристик покриттів, що призвело до перевищення температури вогнезахищеної пластини на 150 °С і 220 °С вище, ніж температура пластини без гідротермального старіння.

В [182] представлено результати експериментального та чисельного моделювання для отримання коефіцієнту теплопровідності двох типів реактивних вогнезахисних покриттів після пришвидшеного старіння. Результати вимірювань збільшеної товщини покриття і розміру бульбашок показують, що пришвидшене старіння негативним чином впливає на теплофізичні характеристики покриття: зменшення товщини розширення і збільшення розміру бульбашок, що призводить до збільшення коефіцієнту теплопровідності.

В [183] було досліджено захисну дію верхнього покриття на реактивне вогнезахисне покриття в умовах корозії соляною кислотою, пришвидшеного ультрафіолетового старіння і природного атмосферного впливу. Було встановлено, що захисні ефекти помітні при будь-яких умовах старіння. Тому захисне верхнє покриття вважається незамінним для вогнезахисних покриттів, що використовуються на відкритому просторі, щоб забезпечити найкращі довготривалі характеристики вогнезахисної здатності.

В [184] описано пасивні вогнезахисні покриття, що широко використовуються в нафтовій, газовій та хімічній промисловості для захисту морських і наземних об'єктів від впливу вогню після тривалого атмосферного впливу. Результати показали, що атмосферний вплив змінює фізичну форму покриття в процесі його експлуатації, викликає корозію вогнезахищених

конструкцій морських і наземних об'єктів і впливає на вогнезахисну здатність покриттів, а відтак і на вогнестійкість вогнезахищених конструкцій.

В [185] досліджено вплив ступеня полімеризації поліфосфату амонію на строк придатності вогнезахисних покриттів на водній основі. Як основу в вогнезахисних покриттях використовували 5 видів поліфосфату амонію з різним ступенем полімеризації. Після випробувань на пришвидшене старіння було детально досліджено вплив кліматичних факторів на вогнезахисну здатність покриттів в результаті випробувань на вогнестійкість.

З приведеного вище аналізу стає зрозумілим, що оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій без врахування впливу кліматичних факторів, агресивного природного середовища призведе до помилкового визначення меж вогнестійкості вогнезахищених будівельних конструкцій. А існуючі на сьогоднішній день методи оцінювання вогнестійкості вогнезахищених будівельних конструкцій позбавлені алгоритму врахування таких впливів.

1.8 Системний аналіз процесу забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій

Проведений аналіз показав, що оцінювання вогнестійкості вогнезахищених будівельних конструкцій та вогнезахисної здатності покриттів будівельних конструкцій розрахунково-експериментальним методом є актуальною і недостатньо вивченою проблемою. Це пояснюється наявністю нерозкритих особливостей підвищення ефективності застосування розрахунково-експериментального методу для визначення меж вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій. Ці особливості можливо врахувати шляхом обґрунтування параметрів математичних моделей, що описують фізико-хімічні процеси при нагріванні цих конструкцій з використанням вогнезахисних матеріалів з визначеними показниками в умовах стандартного та альтернативних режимів пожежі [186–190].

При цьому сценарій розвитку пожежі впливає на вогнестійкість конструкції [186], однак повинен враховувати наявність системи вогнезахисту з урахуванням найбільш значущих параметрів, що впливають на вогнестійкість вогнезахисних конструкцій: початкові та граничні умови теплообміну, товщина утвореного покриття, умови нагрівання і метод випробувань на вогнестійкість [187].

Важливу роль в оцінюванні вогнестійкості відіграють чисельні моделі для прогнозування межі вогнестійкості, включаючи такі властивості матеріалу, як теплопровідність і товщина вогнезахисного покриття [188]. Коефіцієнт теплопровідності вогнезахисних покриттів розраховували розв'язанням обернених задач теплопровідності. В результаті встановлено, що рівняння Єврокодів не дає точної залежності коефіцієнту теплопровідності покриття від температури для використання в чисельному моделюванні теплопередачі.

При проведенні експериментальних досліджень характеристик вогнезахисних покриттів в стандартних і нестандартних умовах пожежі [189] необхідно враховувати умови і швидкість нагрівання. Тому що, як підтверджує дослідження [189], існуюча процедура розробки вогнезахисних покриттів має недоліки, що полягають у неврахуванні розробниками умов, при яких буде застосовуватися вогнезахисна речовина.

Проте існують дослідження [190], в яких представлено нову методологію випробувань для вивчення характеристик вогнезахисних покриттів при нестандартних режимах нагрівання, що володіє перевагами (надійність, відтворюваність, універсальність, швидкість і вартість випробувань). Встановлено, що швидкість нагрівання і товщина покриття не істотно впливають на значення ефективного коефіцієнту теплопровідності.

Підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій можливо досягнути завдяки застосуванню вогнезахисних речовин, що утворюють на поверхні покриття, які мають наноситися з необхідною мінімальною товщиною, яка забезпечить нормовану межу їх вогнестійкості [191, 192].

При цьому необхідно брати до уваги теплофізичні характеристики вогнезахисних покриттів [193–196], які можуть бути розраховані як постійні величини під впливом різних факторів (тип покриття, товщина покриття, температурного режиму пожежі) [193]. Авторами [194] досліджені питання щодо використання коефіцієнту теплопровідності, який залежить від температури. Використання такого підходу є більш точним, у порівнянні з [193], так як коефіцієнт теплопровідності вогнезахисного покриття є функцією від температури і моделювання з його використанням призводить до більш точнішого оцінювання вогнестійкості з мінімальними похибками.

У [195] пропонується теплофізичні характеристики вогнезахисного покриття знаходити розв'язанням обернених задач теплопровідності, що дозволяє з достатньою для інженерних розрахунків точністю прогнозувати вогнезахисну здатність покриттів, використовуючи результати випробувань на вогнестійкість різних конструкцій [196].

Щодо методів визначення вогнезахисної ефективності засобів вогнезахисту для таких вогнезахищених конструкцій, як правило, застосовується експериментальний метод, який передбачає використання їх фрагментів, що є досить затратним і трудомістким [197, 198].

Крім того, під час таких випробувань можливо застосування лише певного температурного режиму [199], що не завжди відповідає особливостям експлуатації конкретної конструкції [200]. Розрахунок вогнестійкості вогнезахищених конструкцій можливо проводити на зразках зменшених розмірів при різних швидкостях нагрівання та температурних режимах пожежі в печі за результатами вогневих випробувань [201].

Отже, при оцінюванні та забезпеченні вогнестійкості будівельних конструкцій необхідно враховувати всі види впливу з урахуванням умов використання: вид конструкції та вогнезахисного покриття, теплофізичні характеристики вогнезахисного покриття, умови використання вогнезахищеної конструкції, температурно-вологісний режим при використанні конструкцій.

Висновки до розділу 1

1. Аналіз сучасного стану забезпечення пожежної безпеки будівель та споруд промислового та цивільного будівництва показав наявність протиріч, що виникають в процесі аналізу умов забезпечення вогнестійкості незахищених та вогнезахищених будівельних конструкцій. Розв'язання цих протиріч створює умови для безпечної експлуатації будівель та споруд з використанням вогнезахищених залізобетонних конструкцій з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів. На підставі аналізу встановлено, що забезпечення нормованого значення межі вогнестійкості несучих елементів залізобетонних будівельних конструкцій є важливою і досить складною проблемою, розв'язання якої дозволить на стадії проєктування, будівництва та експлуатації будівель і споруд об'єктів промислового та цивільного будівництва застосовувати будівельні конструкції, які здатні забезпечити будівлям чи спорудам стійкість при високотемпературному впливі або при руйнуванні внаслідок порушення нормальних умов функціонування об'єкту.

2. Аналіз надзвичайних ситуацій та пожеж у світі показав, що більшість пожеж виникають в будівлях і спорудах (51 %). Для України цей показник протягом останніх десяти років становить 52,7 % від загальної кількості, а кількість загиблих людей на них – 95,5 %. При цьому основними принципами забезпечення вогнестійкості конструкцій є використання активних та пасивних засобів підвищення вогнестійкості залізобетонних конструкцій. В результаті проведеного аналізу встановлено, що велика кількість надзвичайних ситуацій, в тому числі внаслідок пожеж, відбувається через нехтування або неврахування під час проєктування вимог пожежної безпеки щодо вогнестійкості будівельних конструкцій, в тому числі і вогнезахищених.

3. Одним із пріоритетних напрямків забезпечення вогнестійкості будівель та споруд є використання вогнезахищених будівельних конструкцій. Підвищення вогнестійкості вогнезахищених будівельних конструкцій забезпечується використанням вогнезахисних речовин з обґрунтованими

параметрами. Ефективним принципом підвищення вогнестійкості вогнезахисних будівельних конструкцій є застосування вогнезахисних покриттів для вогнезахисту залізобетонних конструкцій. Проведено аналіз, в результаті якого встановлено, що існує велика кількість вогнезахисних речовин та матеріалів для підвищення меж вогнестійкості залізобетонних конструкцій. Проте, на сьогоднішній день недостатньо точно та не в повній мірі виокремлено перелік необхідних параметрів теплового та напружено-деформованого стану вогнезахисних несучих залізобетонних конструкцій для забезпечення вогнестійкості будівель та споруд.

4. Вогнезахисні покриття представлені широким спектром як вітчизняного, так і іноземного виробництва, аналіз характеристик яких потребує детального вивчення. Враховуючи викладене, визначення ефективних засобів, технологій та методів розрахунку вогнестійкості будівельних конструкцій та параметрів вогнезахисту будівельних конструкцій в цілому є досить актуальною проблемою, вирішення якої дозволить оцінювати вогнестійкість вогнезахисних будівельних конструкцій.

5. Експериментальні методи оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій є найбільш точними і такими, що надають найдостовірнішу інформацію щодо меж вогнестійкості будівельних конструкцій в умовах їх випробувань. Проте, поряд з перевагами такі методи мають і достатню кількість недоліків. До таких недоліків відносяться: складність виготовлення, підготовки і проведення випробувань на вогнестійкість великогабаритних будівельних конструкцій, великі матеріальні затрати при випробуваннях у акредитованих лабораторіях, неможливість перенесення результатів випробування однієї конструкції на конструкції всіх типорозмірів та видів, незадовільна адгезія вогнезахисного покриття до захищаємої поверхні під час впливу пожежі, проблема збереження цілісності вогнезахисного покриття, та як наслідок, невиконання своїх захисних функцій. Все це накладає деякі обмеження на використання тільки експериментального

методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій.

6. Використання розрахункових методів оцінювання вогнестійкості незахищених та вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій, порівняно з експериментальним, має ряд переваг. Вони полягають у можливості проведення розрахунків без великих матеріальних затрат, хоча і повинні бути сертифіковані програмні продукти. Неточності у задаванні початкових, граничних умов та неточність у використанні математичних та моделей фізичних процесів у вогнезахищених конструкціях при тепловому впливі пожежі, можуть призвести до помилкового оцінювання вогнестійкості вогнезахищених будівельних конструкцій при проектуванні будівель та споруд з таких конструкцій.

7. Оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій без врахування впливу кліматичних факторів та агресивного середовища призводить до помилкового визначення меж вогнестійкості вогнезахищених будівельних конструкцій. Існуючі методи оцінювання вогнестійкості вогнезахищених будівельних конструкцій позбавлені процедури врахування таких впливів. Тому розробка методів оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій, які б враховували вплив кліматичних чинників, є актуальною проблемою, вирішення якої дозволить забезпечити стійкість будівель та споруд під час пожеж та надзвичайних ситуацій

8. Виконаний аналіз дає змогу констатувати тенденцію поширення застосування розрахунково-експериментального методу для оцінювання меж вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій. У методі має бути можливість визначення теплофізичних характеристик матеріалів різних типів як функції температури, забезпечувати досягнення заданої точності оцінювання вогнестійкості вогнезахищених будівельних конструкцій та пов'язаної з нею точності визначення теплофізичних характеристик бетону та вогнезахисних покриттів. При визначенні

теплофізичних характеристик бетону та вогнезахисних покриттів повинна бути можливість використання даних вимірювання температур та деформацій усіх випробувань одночасно. Метод та процедури реалізації повинні бути максимально простими та зрозумілими для користувачів, має бути реалізованим у вигляді комп'ютерних програм з яким та максимально простим інтерфейсом, а також документацією користувача, оскільки застосування розрахункових методів та процедур їх реалізації є трудомісткою обчислювальною процедурою, метод та комп'ютерні програми повинні адекватними, достовірними, інформативними та пройти всебічну апробацію.

Таким чином, постає потреба у розробці розрахунково-експериментальних методів оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій.

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

В розділі розроблено математичну модель та розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій. Розглянуто алгоритм застосування запропонованого методу, надано опис процедур його реалізації. Перевірено працездатність запропонованого методу при виявленні взаємозв'язку між параметрами пасивного вогнезахисного штукатурного покриття та вогнестійкістю вогнезахисеного багатопустотного залізобетонного перекриття.

2.1 Розробка моделі фізичних процесів та математичної моделі вогнестійкості вогнезахисеної залізобетонної конструкції

До основних експлуатаційних характеристик будівель та споруд промислового та цивільного призначення можна віднести довговічність, надійність, економічність, які багато в чому обумовлені особливостями теплового стану їх конструктивних елементів (конструкцій). Процедура дослідження теплового стану вогнезахисених будівельних конструкцій будівель та споруд включає такі етапи: виявлення основних фізичних особливостей задачі (процесу тепломасопереносу); розробка і обґрунтування математичної моделі досліджуваного процесу; розробка і вибір відповідних методів і засобів для вирішення і реалізації сформульованих задач; дослідження математичної моделі, перевірка адекватності математичної моделі; оцінювання отриманих результатів в сукупності вимог до досліджуваних процесів, станів і методів управління ними; вибір раціональних конструктивних рішень і режимів експлуатації будівлі; визначення оптимальних параметрів досліджуваної системи. Процедуру розробки методу оцінювання вогнестійкості

вогнезахищених залізобетонних конструкцій пропонується розглянути на прикладі багатопустотної залізобетонної плити перекриття, як найбільш складної конструкції з точки зору геометрії, наявності пустот, в яких відбувається складний конвективно-радіаційний теплообмін, та арматури, яку також потрібно враховувати при визначенні несучої здатності плити перекриття.

Оскільки залізобетонні конструкції часто не задовольняють вимогам пожежної безпеки щодо нормованих значень їх межі вогнестійкості, то актуальним є забезпечення та підвищення вогнестійкості таких конструкцій шляхом їх вогнезахисту із використанням різноманітних речовин та матеріалів. При проектуванні вогнезахисту таких конструкцій гостро постає питання щодо точності розрахунку теплового стану як захищених, так і незахищених багатопустотних залізобетонних перекриттів. Результати розрахунку значною мірою визначаються точністю формулювання параметрів моделі, що забезпечують її адекватність реальним процесам теплообміну при випробуваннях на вогнестійкість. До таких параметрів відносяться теплофізичні характеристики: коефіцієнт теплопровідності, питома об'ємна теплоємність як бетону, так і вогнезахисного покриття. Не менш значимими параметрами є умови випробувань (кількість зразків, значення середньооб'ємної температури та вологості у випробувальній камері), які потрібно забезпечувати під час процесу визначення ефективності покриттів.

2.1.1 Алгоритм розробки математичної моделі

При розробці математичної моделі використана структурно-логічна схема, представлена на рис. 2.1 [204].

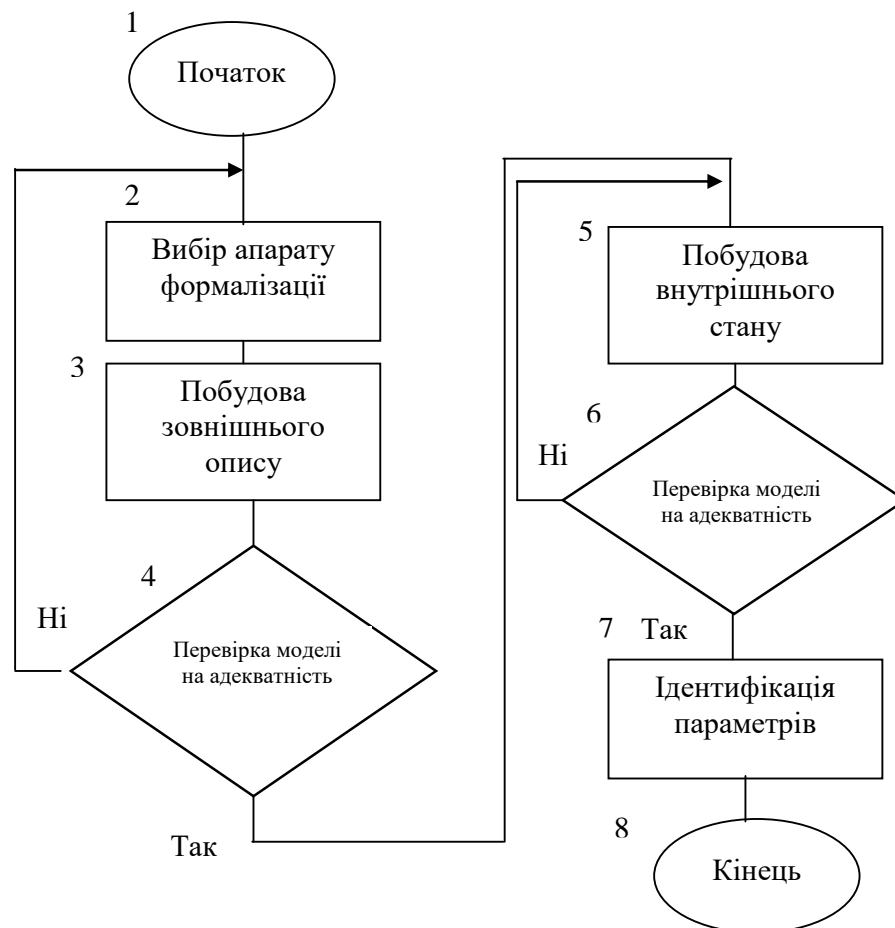


Рис. 2.1 Структурно-логічна схема побудови математичної моделі

Одним з етапів створення методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисної залізобетонної конструкції є побудова адекватної моделі фізичних процесів і математичної моделі теплових процесів, що відбуваються в досліджуваних залізобетонних перекриттях з вогнезахисним покриттям.

2.1.2 Початкові та граничні умови математичної моделі

При розробці математичної моделі [205] використовувалась модель фізичного процесу, як зображено на рис. 2.2.

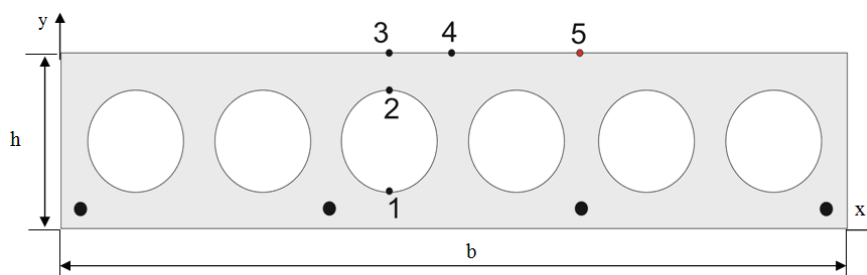


Рис 2.2 Схема залізобетонного перекриття в двохвимірній постановці: h – товщина плити; b – ширина плити; x – координата по ширині конструкції; y – координата по товщині конструкції

Під час випробування нижня поверхня перекриття нагрівається конвективно-радіаційними механізмами теплообміну від гарячих газів в печі з температурою T_{c1} , яка є близькою до кривої стандартної пожежі (або іншого альтернативного режиму пожежі), і коефіцієнтом тепловіддачі $\alpha_{c1}=25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ для стандартного температурного режиму пожежі і $50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ для температурного режиму вуглеводневої пожежі. Верхня поверхня перекриття охолоджується конвекцією в навколишнє повітря з температурою T_{c2} , коефіцієнт тепловіддачі з необігрівної поверхні α_{c2} приймається залежним від температури [206].

У середині перекриття тепло передається не тільки теплопровідністю, а й конвективно-радіаційними механізмами теплообміну в порожнинах перекриття. Приймається умова ідеального теплового контакту між окремими шарами перекриття, тобто забезпечується неперервність поля температур.

При нагріванні знизу відповідна кількість теплоти теплопровідністю через нижній шар бетону по всій площі перекриття досягає пустот, прогріваючи спочатку нижню їх частину. Далі тим же механізмом теплопровідності нагріваються від низу до верху бетонні перемички з боків пустот (із значно меншою змінною площею перемичок), і далі – верхній необігрівний шар бетону знову по всій площі перекриття. Паралельно з передачею теплоти теплопровідністю по перемичках через порожнини тепла енергія передається

вільною конвекцією повітря і випромінюванням від нижніх більш нагрітих до верхніх більш холодних циліндричних стінок порожнин.

Двовимірною математичною моделлю являється система рівнянь:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (2.1)$$

рівняння руху повітря в порожнині за умови вільної конвекції:

$$\rho \left(\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) = \rho g - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \cdot \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \cdot \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) \quad (2.2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \cdot \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \cdot \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) \quad (2.3)$$

рівняння нерозривності для повітря в порожнині:

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} = 0 \quad (2.4)$$

рівняння стану стискання газу для повітря в порожнині:

$$PV = \frac{m}{M} RT, \quad (2.5)$$

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

$$\left. \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \right|_L = \frac{q_r}{\lambda}, \quad (2.6)$$

водночас радіаційно-конвективний теплообмін з необігрівною поверхнею перекриття дорівнює:

$$\alpha_{\varphi TC} = 20 + 0,19 \cdot T + 0,029 \cdot C + 0,0082 \cdot \varphi \cdot T - 0,0025 \cdot \varphi \cdot C - 0,0005 \cdot T \cdot C - 0,001 \cdot \varphi^2 - 0,001 \cdot T^2 + 0,0015 \cdot C^2 \quad (2.7)$$

У формулі (2.7) $\alpha_{\varphi TC}$, Вт/м²·°С – вперше емпірично виведений коефіцієнт теплообміну між необігрівною поверхнею та повітрям навколишнього середовища з урахуванням відносної вологості φ , %, температури T , °С та концентрації твердих домішок в повітрі C , мкг/м³, про що більш детально буде описано нижче у підпункті 2.1.3. В (2.7) φ , T , C записані в кодованому вигляді.

умови симетрії (відсутності теплообміну) на бічних гранях періодичної частини розглянутої залізобетонної плити (рис. 2.3, б)

$$\frac{\partial T(0, y, t)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T(a, y, t)}{\partial x} = 0 \quad (2.8)$$

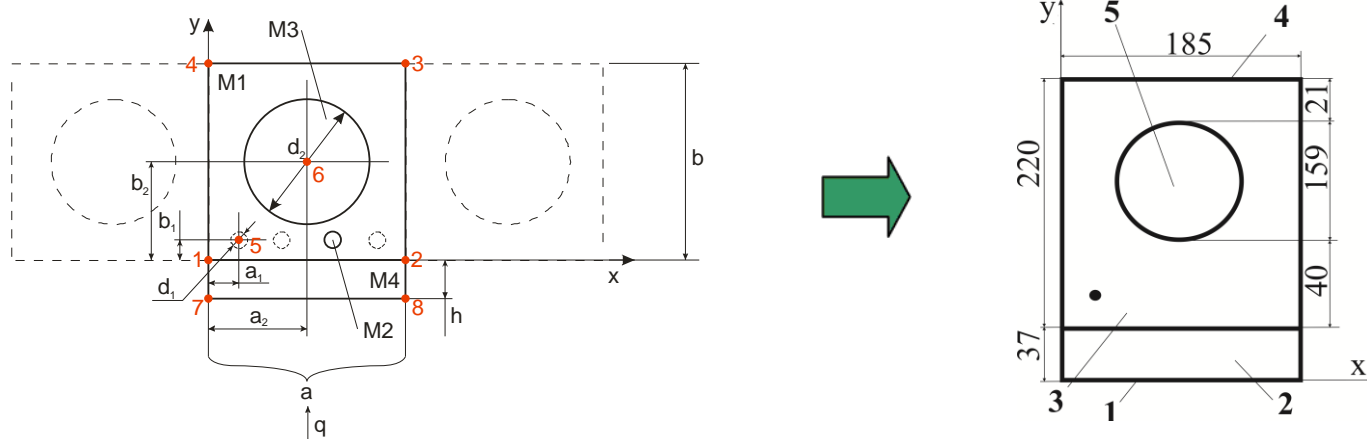


Рис. 2.3 Схема періодичної частини залізобетонного перекриття для моделювання: 1 – поверхня нагріву в печі; 2 – штукатурка; 3 – бетон; 4 – необігрівна поверхня; 5 – порожнина; $M1$ – бетон; $M2$ – арматура; $M3$ – повітря; $M4$ – штукатурне покриття; a – товщина періодичної частини, $a=0,185$ м

В (2.1) – (2.8): t – час, с; V_x , V_y – компоненти швидкості по x та y , м/с; m/M – кількість речовини, моль; ρ – густина, кг/м³; C_p – питома теплоємність, Дж/(кг·°С); μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с; q_r – питомий

радіаційний потік на поверхні порожнини, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $d\varphi$ – зміна кутового коефіцієнта; σ – стала Стефана-Больцмана, $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; V – об'єм повітря в порожнині, м^3 ; P – тиск повітря в порожнині, Па ; g – прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$; R – універсальна газова стала, $8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$, \vec{n} – нормальний вектор до поверхні; T – температура, $^\circ\text{C}$; λ – коефіцієнт теплопровідності залізобетону, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; L – межа порожнини.

Неоднорідність (бетон, повітря в порожнинах, вогнезахисне покриття) у розглянутій моделі враховано залежностями C_v (питома об'ємна теплоємність у $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$), ρ і λ від координат x і y .

Існує два підходи у задаванні параметрів при моделюванні теплового стану та вогнестійкості як вогнезахищених, так і незахищених багатопустотних залізобетонних перекриттів: 1) задавання параметрів із нормативних документів (ДБН, ДСТУ, Єврокоди та інші довідкові джерела); 2) задавання параметрів, знайдених за результатами випробувань будівельних конструкцій на вогнестійкість (розв'язання обернених та прямих задач теплопровідності) [208]. Обидва підходи знайшли широке використання в практиці розрахунків стаціонарного та нестаціонарного прогріву вогнезахищених багатопустотних залізобетонних перекриттів при проектуванні, реконструкції, будівництві нових об'єктів [209, 210].

Проте, значення межі вогнестійкості багатопустотних залізобетонних плит перекриттів, знайдені при використанні таких підходів різняться між собою, адже неточність у задаванні чи використанні таких параметрів може призвести до помилкового визначення меж вогнестійкості досліджуваних конструкцій. Зазначене може негативно вплинути на основні показники пожежної статистики: загибель та травмування людей на пожежах, кількість пожеж, кількість зруйнованих та пошкоджених будівель.

Система диференціальних рівнянь механічної рівноваги:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} + X = 0, \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} + Y = 0, \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + Z = 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

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

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

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

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

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

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, & \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, & \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \\ 2\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y}, & 2\varepsilon_{yz} = \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z}, & 2\varepsilon_{zx} = \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}, \end{cases} \quad (2.10)$$

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

$$\sigma_{ik} (I, k=x, y, z). \quad (2.11)$$

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

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

$$\varepsilon_{ik} = \frac{1}{2G} \left[\sigma_{ik} - \frac{\mu}{1+\mu} s \delta_{ik} \right] + \alpha T \delta_{ik}. \quad (2.12)$$

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

Математична модель термонапруженого стану (2.9) – (2.12) також інтегрується за допомогою чисельного методу скінчених елементів.

Модель (2.9) – (2.12) розглядається у формі переміщень, тобто для випадків, коли шуканою роздільною функцією служить переміщення. Така постановка аналізу термонапруженого стану залізобетонних конструкцій була обрана з міркувань того, що нелінійна залежність між напруженнями та деформаціями має прояв вже на ранніх стадіях деформацій, тобто:

$$a(u, v) = e(v) = 0. \quad (2.13)$$

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

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

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

Вираз потенційної енергії для тривимірного напруженого стану має вигляд:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \varepsilon^T \sigma d\Omega = \frac{1}{2} \int_{\Omega} (Bu)^T D \cdot (Bu) d\Omega. \quad (2.14)$$

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

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

2.1.3 Рівняння регресії для визначення коефіцієнту тепловіддачі між необігрівною поверхнею та повітрям навколишнього середовища

В основі методу планування багатофакторного експерименту лежить припущення про необхідність отримання певного уявлення про поверхню відгуку чинників, яку в загальному випадку запишемо у вигляді [211]:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i), \quad (2.15)$$

де Y – відгук процесу, тобто параметр, який підлягає вивченню та оптимізації, $X_1 - X_i$ – відомі параметри, що змінюються при постановці експерименту.

Значення Y та X визначалися в процесі проведення досліджень і є відомими на етапі багатофакторного планування експерименту.

Оскільки вид функції Y заздалегідь не відомий, її обирали у вигляді фрагменту полінома, рівняння якого залежало від передбачуваного характеру залежності та необхідної точності її визначення.

Математичне очікування функції представлено у вигляді:

$$M(Y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j \quad (2.16)$$

Коефіцієнти рівняння (2.16) пов'язані співвідношеннями (2.17):

$$\beta_1 = \frac{\partial f}{\partial X_1}; \quad \beta_2 = \frac{\partial f}{\partial X_2}; \quad \beta_{12} = \frac{\partial^2 f}{\partial X_1 \partial X_2}; \quad \beta_{11} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X_1^2}; \quad \beta_{22} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X_2^2}; \dots, \quad (2.17)$$

З огляду на особливості отримання регресійної залежності коефіцієнту тепловіддачі, розглядалося розкладання функції в степеневий ряд. Точність, з якою степеневий ряд описує той або інший процес, буде залежати від порядку (міри) ряду, тобто від того, з яким показником міри є присутніми останні члени ряду. Якщо описувати будь-який процес у вузькому інтервалі змінних $X_1 \dots X_i$, то майже завжди можна обмежитися частиною степеневого ряду, залишивши лише члени нижчих порядків.

Перевірка моделі на інформативність проводилася шляхом розрахунку множинного коефіцієнту кореляції R та перевірки його статистичної значущості [212]. Для подальших обчислень зручно використовувати R^2 -коефіцієнт детермінації (міру визначеності). Коефіцієнт детермінації R^2 показує відношення між розсіюванням, що зумовлено рівнянням регресії \hat{f}_i відносно загального середнього за всіма результатами дослідів \bar{f} , та розсіюванням результатів спостережень f_i відносно загального середнього за всіма результатами дослідів \bar{f} :

$$R^2 = \frac{SS_D}{SS_T} = \frac{SS_T - SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - 169,531915/47815,5756 = 0,996 \quad (2.18)$$

Тут, сума квадратів регресії $SS_D = \sum_{i=1}^N (\hat{f}_i - \bar{f})^2 = 47299,3729$; сума квадратів

залишків $SS_R = \sum_{i=1}^N \hat{u}_i^2 = \sum_{i=1}^N (f_i - \hat{f}_i)^2 = 169,531915$; загальна сума квадратів

$$SS_T = \sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})^2 = 47815,5756.$$

За отриманим коефіцієнтом детермінації R^2 для моделі, що містить три чинники та один відгук, отримали наступний вигляд рівняння регресії:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_2 X_2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_3 X_3 + \beta_{33} X_3^2 \quad (2.19)$$

Рівняння (2.19) показує залежність відгуку Y від змінної X_{ij} .

Для спрощення способів знаходження коефіцієнтів регресії приймалися наступні допущення.

1. Результати спостережень $y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n$ (де n – число спостережень над величиною Y) є незалежними, нормально розподіленими випадковими величинами.

2. Дисперсії $D(y_i)$ дорівнювали одна одній або пропорційні відомій функції $\Phi(Y)$.

3. Змінні $X_1 \dots X_i$ є незалежними і визначалися з похибкою, якою можна знехтувати в порівнянні з величиною $\sigma[y_i]$.

Для пошуку коефіцієнтів використовувався матричний метод, коли експериментальні дані представляються у вигляді двох матриць X та Y :

$$X = \begin{pmatrix} x_{01} & x_{11} & x_{21} \\ x_{02} & x_{12} & x_{22} \\ x_{03} & x_{13} & x_{23} \end{pmatrix}; Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix}. \quad (2.20)$$

Транспонована матриця X^* множилася на матрицю X та на матрицю Y . Із добутку X^*X обчислювалася зворотна матриця, яка множилася на добуток X^*Y .

В результаті проведення проміжних операцій над матрицями, отримали матрицю T :

$$T = (X^*X)^{-1}(X^*Y) = \begin{pmatrix} c_{00}(0y) & c_{01}(1y) & c_{02}(2y) & c_{03}(3y) \\ c_{10}(0y) & c_{11}(1y) & c_{12}(2y) & c_{13}(3y) \\ c_{20}(0y) & c_{21}(1y) & c_{22}(2y) & c_{23}(3y) \\ c_{30}(0y) & c_{31}(1y) & c_{32}(2y) & c_{33}(3y) \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

Звідки коефіцієнти β_i рівняння (2.21) розраховувався за формулою:

$$\beta_i = \sum_{j=0}^k c_{ij}(jy) \quad (2.22)$$

де $c_{ij}(ij)$ – елементи шуканої вище матриці T .

Отже, отримано рівняння залежності відгуку Y від фактора X_i .

В цьому методі, за відгук було обрано коефіцієнт теплообміну $\alpha_{\phi TC}$ за умови, що він прагне до мінімуму. Незалежними змінними (факторами) були обрані: X_1 – відносна вологість (ϕ), X_2 – температура навколишнього середовища (T), X_3 – концентрація твердих домішок в повітрі (C).

Для отримання значень відгуку для певних значень вхідних факторів, використовувався спеціально створений вимірювальний стенд, що дозволяв регулювати значення таких факторів у зазначених діапазонах із зазначеною точністю [213]. Такий стенд для вимірювання окремих показників цих факторів, містив високоточний інтегрований датчик температури та вологості повітря AM2305 (діапазон вимірюваних температур: $-40\dots+120$ °C; похибка визначення температури: $\pm 0,3$ °C; діапазон вологості: $0\dots 100$ %; похибка вимірювання вологості: ± 2 %); датчик визначення концентрації твердих домішок у повітрі (діапазон вимірювань: $0-1000$ мкг/м³; точність вимірювання 1 мкг/м³). Коефіцієнт теплообміну визначався за допомогою скануючого диференціального калориметру Discovery HP-TGA 75, TA Instruments, США (діапазон вимірювань: $0-100$ Вт/м²·°C; точність вимірювання $0,01$ Вт/м²·°C).

Коефіцієнт теплообміну $\alpha_{\phi TC}$ між необігрівою поверхнею та повітрям навколишнього середовища з урахуванням вологості ϕ , температури T та концентрації твердих домішок в повітрі C в останньому визначався за емпіричним рівнянням. Використовуючи генерацію рівномірно заповнених точками простору пошуку за допомогою ЛПт–последовательностей Соболя [214,215]

у діапазонах від нижнього до верхнього: відносної вологості від 20 до 80 %, температура навколишнього середовища від 0 до 50 °С, концентрація твердих домішок в повітрі від 0 до 100 мкг/м³, отримані наступні дані, що наведені в табл. 2.1. Планування експерименту здійснювалося не за класичним методом повного факторного експерименту [216], а за допомогою новітніх технік рівномірного заповнення багатofакторного простору з використанням ЛПт – послідовностей Соболя [214,215], що дозволяє рівномірно розташувати точки плану експерименту в багатовимірному просторі пошуку.

Таблиця 2.1

Вхідні дані для побудови регресійної моделі

Відносна вологість, φ, %	Температура навколишнього середовища, t, °С	Концентрація твердих домішок в повітрі, С, мкг/м ³	Y1 (коефіцієнт теплообміну експериментальний)
50	25	50	42,20
35	37,5	25	28,37
65	12,5	75	65,02
72	31,3	13	21,21
42	6,3	63	48,42
57	18,8	38	37,69
27	43,8	88	48,10
61	46,9	6	17,91
31	21,9	56	38,73
76	9,4	31	36,45
46	34,4	81	54,81
38	15,6	18	27,53
68	40,6	68	57,24
23	28,1	44	33,69
53	3,1	94	66,97
44	26,6	3	18,30
74	1,6	53	51,80
29	14,1	28	29,99
59	39,1	78	59,09
51	7,8	16	25,99
21	32,8	66	39,77
66	45,3	41	38,04
36	20,3	91	55,34
70	23,4	9	18,96
40	48,4	59	43,35
55	35,9	34	36,38
25	10,9	84	45,82
33	42,2	21	29,33
63	17,2	71	61,42

Продовження таблиці 2.1

48	4,7	46	41,98
78	29,7	97	77,86
77	39,9	2	11,46
47	14,9	52	44,15
62	2,3	27	34,58
32	27,4	77	47,91
24	21,1	14	24,28
54	46,1	64	49,75
39	33,6	39	35,32
69	8,6	89	74,25
35	11,7	8	21,89
65	36,7	58	49,42
20	49,2	33	31,66
50	24,2	83	57,66
58	30,5	20	27,87
28	5,5	70	42,43
73	18	45	45,10
43	43	95	58,10
56	13,3	5	17,91
26	38,3	55	38,70
71	25,8	30	33,57
41	0,8	80	53,60
49	44,5	17	25,83
79	19,5	67	61,75
34	7	42	36,49
64	32	92	70,38
30	35,2	11	24,09
60	10,2	61	52,31
45	22,7	36	34,34
75	47,7	86	72,41
67	3,9	23	30,69
37	28,9	73	47,24
52	41,4	48	41,13
21	16,4	98	46,89
51	33,2	1	16,66
21	8,2	51	35,77
66	20,7	26	31,88
36	45,7	76	48,98
43	2	13	25,28
73	27	63	57,40
28	39,4	38	33,50
58	14,5	88	67,35
32	17,6	7	22,55
62	42,5	57	49,07
47	30,1	32	32,06
77	5,1	82	72,47
70	48,8	20	25,25
40	23,8	70	48,27
55	11,3	45	43,05

Продовження таблиці 2.1

25	36,3	95	47,26
75	6,6	4	16,07
45	31,6	54	43,14
60	44,1	29	33,07
30	19,1	79	46,59
23	25,4	16	26,04
53	0,4	66	53,16
38	12,9	41	37,73
68	37,9	91	70,44
42	41	10	22,91
72	16	60	55,26
27	3,5	35	32,68
57	28,5	85	63,91
64	22,3	23	29,59
34	47,3	73	46,97
79	34,8	48	45,09
49	9,8	98	64,90
46	19,9	2	17,73
76	44,9	52	48,04
31	32,4	27	30,14
61	7,4	77	60,95
54	38,7	15	23,26
24	13,7	65	39,06
69	1,2	40	44,25
39	26,2	90	53,66
65	29,3	9	18,89
35	4,3	59	42,02
50	16,8	34	35,30
20	41,8	84	42,08
27	10,6	21	26,38
57	35,6	71	54,40
42	48,1	46	39,85
72	23	96	76,06
26	46,5	5	22,84
56	21,5	55	47,53
41	9	30	33,03
71	34	80	66,56
78	15,2	18	26,31
48	40,2	68	50,34
63	27,7	43	41,93
33	2,7	93	53,48
59	5,9	12	23,26
29	30,9	62	41,19
74	43,4	37	39,34
44	18,4	87	59,59
37	37,1	24	28,19
67	12,1	74	64,76
22	24,6	49	36,51
52	49,6	99	64,92

Продовження таблиці 2.1

38	49,8	0	19,80
68	24,8	50	46,85
23	12,3	25	28,93
53	37,3	75	55,27
61	18,6	13	23,05
31	43,6	63	43,57
76	31,1	38	38,38
46	6,1	88	59,40
79	3	7	18,71
49	28	57	45,74
64	40,4	32	33,73
34	15,4	82	49,08
27	34,2	19	27,50
57	9,2	69	55,30
42	21,7	44	38,05
72	46,7	94	76,17
29	23,2	4	19,94
59	48,2	54	46,99
44	35,7	29	33,01
74	10,7	79	69,46
66	42	16	23,56
36	17	66	45,34
51	4,6	41	39,63
21	29,6	91	44,24
55	26,4	10	21,14
25	1,4	60	40,45
70	13,9	35	38,60
40	38,9	85	53,58
47	7,61	22	29,79
77	32,6	72	63,56
32	45,1	47	36,85
62	20,1	97	73,60
63	10	2	16,20
33	35	52	37,68
78	47,5	27	30,42
48	22,5	77	55,23
41	28,7	14	24,09
71	3,7	64	59,98
26	16,2	39	33,31
56	41,2	89	61,18
22	38,1	8	23,30
52	13,2	58	47,25
37	0,6	33	33,70
67	25,6	83	68,73
75	19,3	21	27,73
45	44,3	71	50,36
60	31,8	46	42,36
30	6,8	96	48,94
69	36,5	5	15,96

Продовження таблиці 2.1

39	11,5	55	43,70
54	24	30	32,83
24	49	80	45,94
31	5,3	18	25,61
61	30,3	68	55,97
46	42,8	43	37,24
76	17,8	93	75,75
43	14,7	11	23,10
73	39,7	61	54,91
28	27,2	36	31,82
58	2,2	86	66,79
50	45,9	24	29,50
20	20,9	74	39,54
65	8,4	49	48,29
35	33,4	99	54,29
67	16,6	1	14,35
37	41,6	5	41,28
52	29,1	26	30,17
22	4,1	76	41,16
29	47,9	14	25,82
59	22,9	64	52,41
44	10,4	39	37,23
74	35,4	89	75,25
48	32,2	7	20,02

Для уточнення діапазону параметрів навколишнього середовища (вологості φ , температури T та концентрації твердих домішок в повітрі C) за яких досягаються найраціональніші показники коефіцієнта тепловіддачі, було використано метод рівномірно заповнених точками простору пошуку за допомогою ЛПт – послідовностей Соболя.

При цьому враховувалися фізична незалежність вхідних та вихідних параметрів, нормальність розподілу випадкових результатів, стійкість експерименту до перешкод, а порядок виконання досліджень не порушував ортогональність плану.

Отже, було складено план трьохфакторного експерименту. Далі, використовуючи методи статистичного планування n -го порядку, математична модель була отримана у вигляді нелінійного рівняння регресії квадратичної форми для трьох факторів:

$$C_m = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \sum b_{ii} x_i^2, \quad (2.23)$$

де x – безрозмірна змінна ($x_i = \frac{X_i - X_i^{(0)}}{\Delta X_i}$).

За даними експерименту та з використанням методу рівномірно заповнених точками простору пошуку за допомогою ЛПт – послідовностей Соболя розраховано коефіцієнти регресії (у кодованому масштабі):

$$\begin{aligned} b_0 &= 20 & b_{11} &= -0,001 & b_{22} &= -0,001 & b_{33} &= 0,0015 \\ b_1 &= 0 & b_{12} &= 0,0082 & b_{23} &= -0,0005 \\ b_2 &= 0,19 & b_{13} &= -0,0025 \\ b_3 &= 0,029 \end{aligned}$$

Табличне значення t-критерію Стьюдента при 200 дослідях та рівні значимості 0,05 складало 1,96. Довірчі інтервали при розрахунку коефіцієнтів регресії, відповідно: $b_0 - 0,30$; $b_i - 0,38$; $b_{ii} - 0,28$; $b_{ij} - 0,31$.

Отримана модель залежності відносної похибки проведення контролю від трьох визначених факторів мала вигляд:

$$\alpha_{\varphi TC} = 20 + 0,19 \cdot T + 0,029 \cdot C + 0,0082 \cdot \varphi \cdot T - 0,0025 \cdot \varphi \cdot C - 0,0005 \cdot T \cdot C - 0,001 \cdot \varphi^2 - 0,001 \cdot T^2 + 0,0015 \cdot C^2 \quad (2.24)$$

В табл. 2.2 представлені результати розрахунку коефіцієнту теплообміну, отримані за регресійною моделлю, між необігрівною поверхнею та повітрям навколишнього середовища з урахуванням вологості φ , температури T та концентрації твердих домішок в повітрі C . Крім того, в цій таблиці для порівняння наведені експериментальні значення цих коефіцієнтів, а також абсолютні і відносні похибки визначення коефіцієнтів в кожній точці, що показує точність моделі.

Результати розрахунку та порівняння коефіцієнту теплообміну між
необігрівною поверхнею та повітрям навколишнього середовища за
регресійною моделлю та експериментально отриманими даними

Відносна вологість, φ, %	Температура навколишнього середовища, t, °C	Концентрація твердих домішок в повітрі, С, мкг/м ³	Y1*, коефіцієнт теплообміну розрахунковий	Y1, коефіцієнт теплообміну експериментальний	ΔY	δY, %
50	25	50	42,91	42,20	0,71	1,69
35	37,5	25	29,52	28,37	1,15	4,07
65	12,5	75	62,47	65,02	-2,55	-3,92
72	31,3	13	20,91	21,21	-0,30	-1,42
42	6,3	63	47,32	48,42	-1,10	-2,26
57	18,8	38	38,12	37,69	0,43	1,14
27	43,8	88	47,16	48,10	-0,93	-1,94
61	46,9	6	17,87	17,91	-0,04	-0,22
31	21,9	56	39,99	38,73	1,26	3,25
76	9,4	31	37,16	36,45	0,71	1,94
46	34,4	81	54,91	54,81	0,10	0,18
38	15,6	18	26,83	27,53	-0,71	-2,56
68	40,6	68	57,64	57,24	0,40	0,70
23	28,1	44	34,07	33,69	0,38	1,14
53	3,1	94	66,99	66,97	0,02	0,03
44	26,6	3	18,59	18,30	0,29	1,61
74	1,6	53	53,86	51,80	2,06	3,98
29	14,1	28	29,94	29,99	-0,05	-0,17
59	39,1	78	59,35	59,09	0,27	0,45
51	7,8	16	25,93	25,99	-0,07	-0,26
21	32,8	66	39,15	39,77	-0,62	-1,56
66	45,3	41	39,78	38,04	1,74	4,57
36	20,3	91	53,47	55,34	-1,88	-3,39
70	23,4	9	19,39	18,96	0,43	2,28
40	48,4	59	44,45	43,35	1,11	2,55
55	35,9	34	35,30	36,38	-1,08	-2,96
25	10,9	84	45,32	45,82	-0,50	-1,08
33	42,2	21	28,46	29,33	-0,86	-2,94
63	17,2	71	59,33	61,42	-2,10	-3,41
48	4,7	46	42,39	41,98	0,41	0,97
78	29,7	97	79,93	77,86	2,07	2,65
77	39,9	2	11,14	11,46	-0,32	-2,82
47	14,9	52	43,49	44,15	-0,66	-1,50
62	2,3	27	33,70	34,58	-0,88	-2,54
32	27,4	77	46,52	47,91	-1,38	-2,89
24	21,1	14	24,54	24,28	0,26	1,06
54	46,1	64	50,55	49,75	0,80	1,60
39	33,6	39	35,71	35,32	0,39	1,10

Продовження таблиці 2.2

69	8,6	89	73,51	74,25	-0,74	-1,00
35	11,7	8	21,88	21,89	-0,01	-0,03
65	36,7	58	50,52	49,42	1,10	2,23
20	49,2	33	32,03	31,66	0,37	1,18
50	24,2	83	58,37	57,66	0,71	1,23
58	30,5	20	27,28	27,87	-0,59	-2,13
28	5,5	70	43,63	42,43	1,20	2,82
73	18	45	45,75	45,10	0,65	1,43
43	43	95	58,39	58,10	0,29	0,49
56	13,3	5	18,59	17,91	0,67	3,77
26	38,3	55	38,33	38,70	-0,37	-0,97
71	25,8	30	33,81	33,57	0,25	0,73
41	0,8	80	54,13	53,60	0,54	1,00
49	44,5	17	25,90	25,83	0,07	0,25
79	19,5	67	62,18	61,75	0,43	0,70
34	7	42	36,39	36,49	-0,10	-0,28
64	32	92	69,20	70,38	-1,18	-1,68
30	35,2	11	23,78	24,09	-0,31	-1,29
60	10,2	61	52,97	52,31	0,67	1,27
45	22,7	36	35,29	34,34	0,95	2,77
75	47,7	86	70,11	72,41	-2,30	-3,17
67	3,9	23	31,77	30,69	1,08	3,51
37	28,9	73	48,20	47,24	0,95	2,02
52	41,4	48	42,35	41,13	1,22	2,95
21	16,4	98	46,04	46,89	-0,85	-1,80
51	33,2	1	16,17	16,66	-0,49	-2,93
21	8,2	51	35,22	35,77	-0,55	-1,55
66	20,7	26	31,40	31,88	-0,48	-1,50
36	45,7	76	48,52	48,98	-0,47	-0,95
43	2	13	25,04	25,28	-0,24	-0,95
73	27	63	56,94	57,40	-0,46	-0,80
28	39,4	38	33,92	33,50	0,42	1,25
58	14,5	88	66,11	67,35	-1,23	-1,83
32	17,6	7	21,58	22,55	-0,97	-4,32
62	42,5	57	49,03	49,07	-0,04	-0,08
47	30,1	32	33,47	32,06	1,41	4,41
77	5,1	82	74,05	72,47	1,58	2,17
70	48,8	20	25,59	25,25	0,35	1,37
40	23,8	70	47,98	48,27	-0,29	-0,60
55	11,3	45	42,28	43,05	-0,77	-1,79
25	36,3	95	46,93	47,26	-0,34	-0,71
75	6,6	4	16,40	16,07	0,33	2,06
45	31,6	54	43,42	43,14	0,29	0,66
60	44,1	29	32,23	33,07	-0,84	-2,54
30	19,1	79	46,61	46,59	0,02	0,04
23	25,4	16	25,46	26,04	-0,59	-2,25
53	0,4	66	54,33	53,16	1,17	2,20
38	12,9	41	36,81	37,73	-0,92	-2,45
68	37,9	91	70,58	70,44	0,14	0,20

Продовження таблиці 2.2

42	41	10	22,76	22,91	-0,15	-0,66
72	16	60	55,64	55,26	0,38	0,69
27	3,5	35	32,33	32,68	-0,35	-1,08
57	28,5	85	62,27	63,91	-1,64	-2,57
64	22,3	23	29,16	29,59	-0,42	-1,43
34	47,3	73	46,83	46,97	-0,14	-0,29
79	34,8	48	46,62	45,09	1,53	3,39
49	9,8	98	64,97	64,90	0,07	0,10
46	19,9	2	17,98	17,73	0,25	1,39
76	44,9	52	48,78	48,04	0,74	1,55
31	32,4	27	30,05	30,14	-0,09	-0,28
61	7,4	77	62,91	60,95	1,96	3,21
54	38,7	15	24,09	23,26	0,84	3,60
24	13,7	65	39,81	39,06	0,75	1,93
69	1,2	40	43,61	44,25	-0,64	-1,44
39	26,2	90	54,40	53,66	0,73	1,37
65	29,3	9	19,10	18,89	0,21	1,12
35	4,3	59	43,13	42,02	1,11	2,64
50	16,8	34	35,12	35,30	-0,18	-0,51
20	41,8	84	42,45	42,08	0,38	0,90
27	10,6	21	27,24	26,38	0,86	3,27
57	35,6	71	55,40	54,40	1,00	1,84
42	48,1	46	39,61	39,85	-0,23	-0,58
72	23	96	77,35	76,06	1,29	1,70
26	46,5	5	22,93	22,84	0,09	0,38
56	21,5	55	47,54	47,53	0,01	0,01
41	9	30	32,76	33,03	-0,27	-0,81
71	34	80	65,98	66,56	-0,57	-0,86
78	15,2	18	26,15	26,31	-0,15	-0,58
48	40,2	68	50,36	50,34	0,02	0,03
63	27,7	43	41,64	41,93	-0,30	-0,71
33	2,7	93	53,24	53,48	-0,24	-0,45
59	5,9	12	23,57	23,26	0,31	1,31
29	30,9	62	41,20	41,19	0,01	0,02
74	43,4	37	37,73	39,34	-1,60	-4,08
44	18,4	87	57,02	59,59	-2,56	-4,30
37	37,1	24	29,27	28,19	1,08	3,83
67	12,1	74	63,13	64,76	-1,63	-2,52
22	24,6	49	35,09	36,51	-1,42	-3,88
52	49,6	99	65,04	64,92	0,11	0,17
38	49,8	0	19,07	19,80	-0,72	-3,65
68	24,8	50	47,42	46,85	0,57	1,22
23	12,3	25	28,23	28,93	-0,70	-2,43
53	37,3	75	55,63	55,27	0,36	0,66
61	18,6	13	23,11	23,05	0,07	0,29
31	43,6	63	42,39	43,57	-1,18	-2,71
76	31,1	38	39,46	38,38	1,08	2,80
46	6,1	88	59,29	59,40	-0,11	-0,18
79	3	7	18,70	18,71	-0,01	-0,07

Продовження таблиці 2.2

49	28	57	45,91	45,74	0,16	0,36
64	40,4	32	34,06	33,73	0,32	0,96
34	15,4	82	49,75	49,08	0,67	1,37
27	34,2	19	26,89	27,50	-0,61	-2,23
57	9,2	69	56,31	55,30	1,01	1,82
42	21,7	44	38,52	38,05	0,47	1,23
72	46,7	94	73,58	76,17	-2,59	-3,40
29	23,2	4	20,40	19,94	0,46	2,31
59	48,2	54	46,23	46,99	-0,76	-1,62
44	35,7	29	31,48	33,01	-1,53	-4,63
74	10,7	79	69,06	69,46	-0,40	-0,57
66	42	16	23,63	23,56	0,07	0,29
36	17	66	45,49	45,34	0,15	0,33
51	4,6	41	40,30	39,63	0,67	1,70
21	29,6	91	43,91	44,24	-0,33	-0,74
55	26,4	10	21,16	21,14	0,02	0,09
25	1,4	60	39,50	40,45	-0,95	-2,35
70	13,9	35	38,52	38,60	-0,08	-0,21
40	38,9	85	53,19	53,58	-0,40	-0,74
47	7,61	22	29,50	29,79	-0,29	-0,98
77	32,6	72	63,61	63,56	0,05	0,08
32	45,1	47	38,00	36,85	1,14	3,11
62	20,1	97	72,28	73,60	-1,32	-1,79
63	10	2	16,15	16,20	-0,05	-0,29
33	35	52	39,42	37,68	1,74	4,61
78	47,5	27	30,36	30,42	-0,06	-0,20
48	22,5	77	54,93	55,23	-0,30	-0,54
41	28,7	14	24,62	24,09	0,53	2,20
71	3,7	64	60,05	59,98	0,07	0,11
26	16,2	39	33,24	33,31	-0,07	-0,20
56	41,2	89	63,23	61,18	2,05	3,35
22	38,1	8	23,47	23,30	0,17	0,75
52	13,2	58	48,54	47,25	1,29	2,72
37	0,6	33	33,98	33,70	0,27	0,82
67	25,6	83	66,76	68,73	-1,97	-2,87
75	19,3	21	27,90	27,73	0,18	0,63
45	44,3	71	50,21	50,36	-0,16	-0,31
60	31,8	46	42,43	42,36	0,07	0,16
30	6,8	96	51,15	48,94	2,21	4,52
69	36,5	5	15,64	15,96	-0,33	-2,04
39	11,5	55	42,77	43,70	-0,92	-2,12
54	24	30	33,21	32,83	0,38	1,15
24	49	80	44,33	45,94	-1,61	-3,51
31	5,3	18	26,34	25,61	0,73	2,85
61	30,3	68	55,31	55,97	-0,67	-1,19
46	42,8	43	38,52	37,24	1,28	3,45
76	17,8	93	78,26	75,75	2,51	3,31
43	14,7	11	23,25	23,10	0,16	0,67
73	39,7	61	54,38	54,91	-0,53	-0,97

Продовження таблиці 2.2

28	27,2	36	32,67	31,82	0,85	2,67
58	2,2	86	66,43	66,79	-0,37	-0,55
50	45,9	24	29,42	29,50	-0,08	-0,26
20	20,9	74	40,09	39,54	0,55	1,40
65	8,4	49	47,65	48,29	-0,64	-1,33
35	33,4	99	54,68	54,29	0,39	0,71
67	16,6	1	14,46	14,35	0,11	0,74
37	41,6	5	40,18	41,28	-1,11	-2,68
52	29,1	26	30,70	30,17	0,53	1,74
22	4,1	76	41,75	41,16	0,60	1,45
29	47,9	14	25,81	25,82	-0,02	-0,06
59	22,9	64	52,93	52,41	0,52	0,99
44	10,4	39	37,11	37,23	-0,11	-0,31
74	35,4	89	72,41	75,25	-2,85	-3,79
48	32,2	7	20,44	20,02	0,42	2,09

Збіжність між змодельованими та експериментально отриманими даними визначалась шляхом побудови діаграми, наведеної на рис. 2.4 (програмний продукт «Statistica 64»).

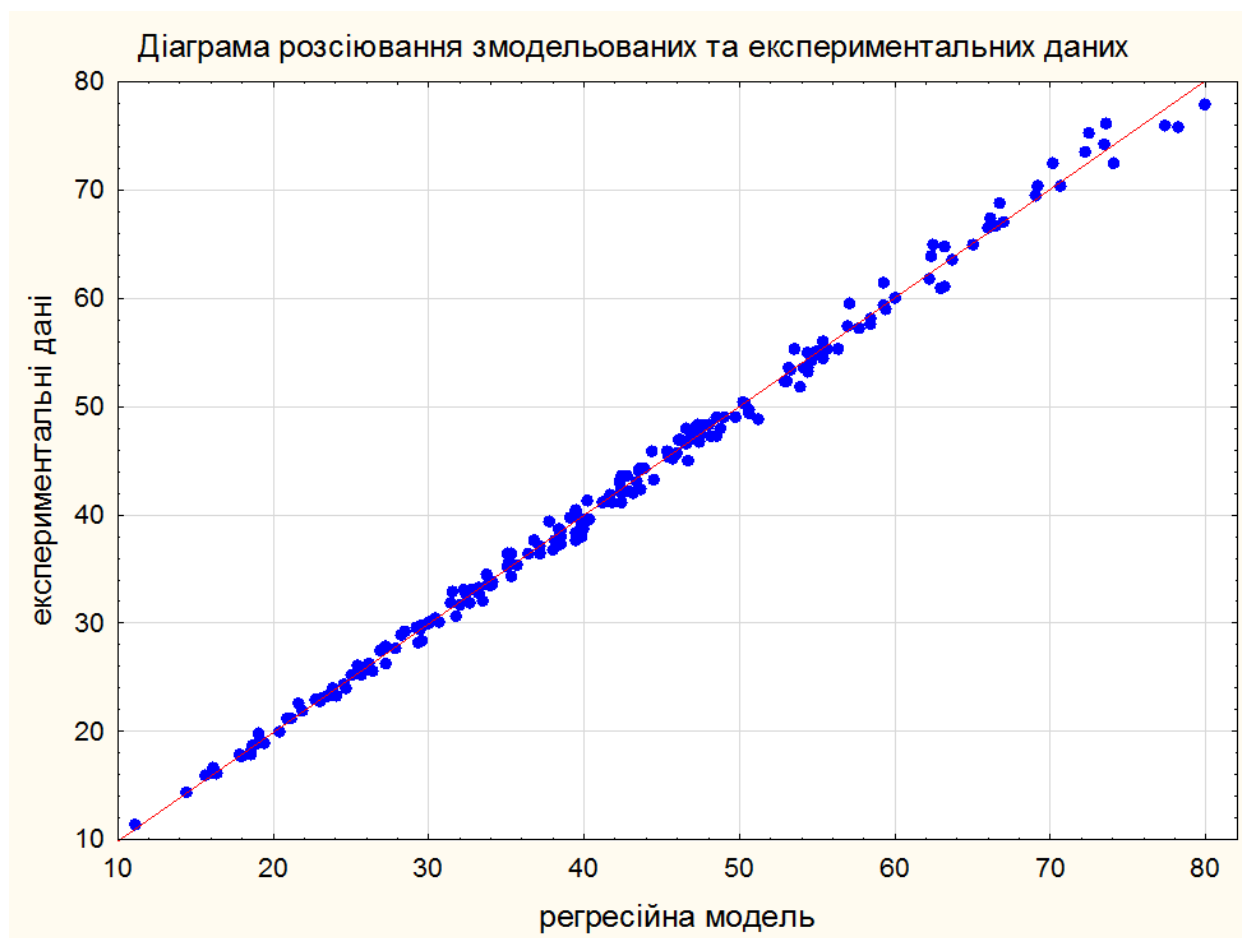


Рис. 2.4. Діаграма розсіювання змодельованих та експериментально отриманих даних Statistica 64.

Для перевірки відповідності отриманої функції відгуку експериментальним даним визначили [214]: адекватність математичної моделі за критерієм Фішера (адекватність зазвичай встановлюється перевіркою F -критерію гіпотези про статистичну незначну відмінність дисперсії адекватності σ_R^2 та дисперсії відтворюваності σ_D^2 результатів експериментів, за якими були отримані коефіцієнти математичної моделі.

За умов:

$$F_{v_D;v_R}^{експ} > F_{\alpha;v_D;v_R}^{крит}, \text{ де } F_{v_D;v_R}^{експ} = \frac{MS_D}{MS_R} \quad (2.25)$$

модель адекватна і прогноз результатів по моделі не суперечить результатам дослідів); оцінку відповідності нулю різниці (залишків) між фактичним і прогнозованим значенням залежної змінної; оцінку відповідності залишків нормальному розподілу (для перевірки нормальності розподілу залишків використовують критерій Колмогорова-Смірнова, χ^2 -квадрат та інші).

Перевірку гіпотези про значущість множинного коефіцієнту кореляції (інформативність моделі) виконують з використанням F -критерію Фішера ($F_{v_D;v_R}^{експ} > F_{\alpha;v_D;v_R}^{крит}$, де $F_{v_D;v_R}^{експ} = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{v_R}{v_D}$). Модель вважають інформативною при $R^2 > 0,95$ та значимо достовірною при рівні значущості за F -критерієм $p \leq 0,05$ (достовірність $\geq 0,95$).

На етапі відтворення поверхні відгуку адекватність отриманої регресійної моделі оцінювалася за показниками [215]:

- сума квадратів регресії $SS_D = \sum_{i=1}^N (\hat{f}_i - \bar{f})^2$;
- сума квадратів залишків $SS_R = \sum_{i=1}^N \hat{u}_i^2 = \sum_{i=1}^N (f_i - \hat{f}_i)^2$;
- загальна сума квадратів $SS_T = \sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})^2$;
- середні квадрати регресії – $MS_D = \frac{SS_D}{v_D}$, залишків – $MS_R = \frac{SS_R}{N-n-1}$,

загальний – $MS_T = \frac{SS_T}{v_T}$, де $v_D = n$, $v_R = N - n - 1$, $v_T = N - 1$ – число степенів свободи;

- дисперсія відтворюваності $\sigma_D^2 = \frac{SS_D}{N-1}$, дисперсія адекватності

$$\sigma_R^2 = \frac{SS_R}{N-n-1}, \text{ загальна дисперсія } \sigma_T^2 = \frac{SS_T}{N-1};$$

- стандартні похибки оцінки відтворюваності - $s_D = \sqrt{\sigma_D^2}$, оцінки адекватності - $s_R = \sqrt{\sigma_R^2}$, загальна - $s_T = \sqrt{\sigma_T^2}$;

- коефіцієнт множинної детермінації R^2 ;

- відношення стандартних відхилень $S.D.ratio = \frac{S.D_R}{S.D_T}$;

- середня відносна величина модельної похибки (або середня похибка апроксимації) $MAPE = \frac{100\%}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{|\hat{u}_i|}{f_i}$,

де $\hat{u}_i = f_i - \hat{f}_i$ - залишки; f_i - задана залежна змінна; \hat{f}_i - вихідний параметр розрахований за допомогою регресійної моделі; N - кількість спостережень; n - кількість заданих незалежних змінних.

В результаті проведених розрахунків за вищенаведеними формулами у математичному додатку MathCAD отримані оцінки адекватності та інформативності створеної регресійної моделі (табл.2.3).

Таблиця 2.3

Результати розрахунку щодо оцінки адекватності та інформативності створеної регресійної моделі

Компонент дисперсії N=200	Сума квадратів	Середній квадрат	Дисперсія	Стандартна похибка оцінки
регресії	$SS_D=47299,3729$	$MS_D=15766,457$ 6	$\sigma_D^2=237,685$	$s_D=15,417$
залишків	$SS_R=169,531915$	$MS_R=0,8649$	$\sigma_R^2=0,8649$	$s_R=0,93$
загальної	$SS_T=47815,5756$	$MS_T=240,2793$	$\sigma_T^2=240,279$	$s_T=15,5$

критерій $F_{\nu_D;\nu_R}^{експ} > F_{\alpha;\nu_D;\nu_R}^{крит}$	$F_{3;196}^{експ}=16268; F_{0,05;3;196}^{крит}=8,53$ Модель адекватна
коефіцієнт детерміна- ції	$R^2=0,996$
середня похибка апрокси- мації	$MAPE=0,02\%$

Таким чином, отримана регресійна модель має експериментальне значення показника Фішера $F_{3;196}^{експ}=16268$, а критичне значення цього критерію з рівнем значущості $\alpha=5\%$ та числом степенів свободи $\nu_R=196$, $\nu_D=3$ складає 8,53.

Отже, умова (2.25) виконується, регресійна модель адекватна і прогноз результатів по моделі не суперечить дійсності.

Регресійна модель інформативна, оскільки $R^2>0,95$, та значимо достовірна за F -критерієм при рівні значущості 5 %, оскільки умова (2.25) виконується для експериментального значення $F_{3;196}^{експ}=16268$.

В результаті дослідження вищенаведеного рівняння регресії були встановлені залежності коефіцієнту теплообміну $\alpha_{\varphi TC}$ від температури навколишнього середовища (T), концентрації твердих домішок у повітрі (C) за різних значень відносної вологості (φ) (рис.2.5). Домішки, в залежності від марки бетону, виду вогнезахисного покриття та виду пального, що використовується для створення відповідного температурного режиму в печі, можуть бути такими: з'єднання азоту (NO_2), з'єднання сірки (SO_2), чадний газ (CO).

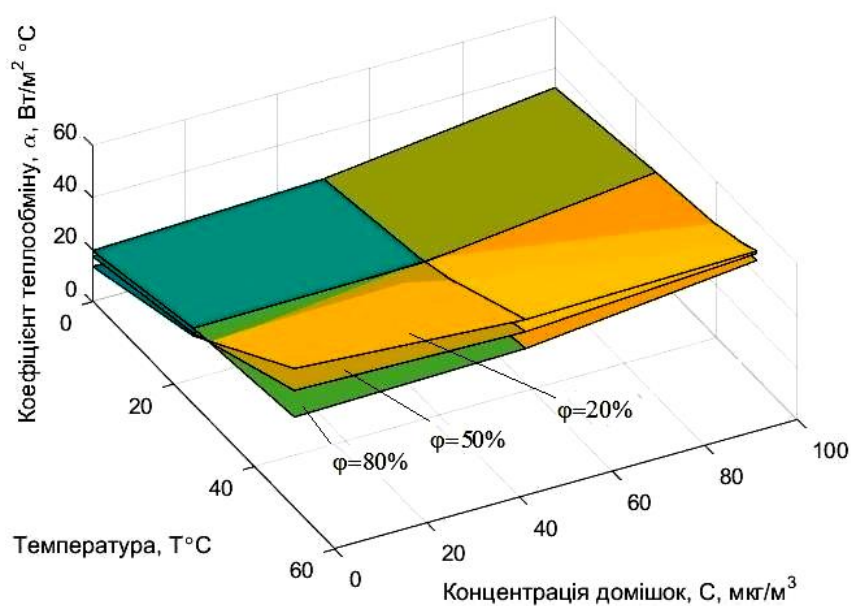
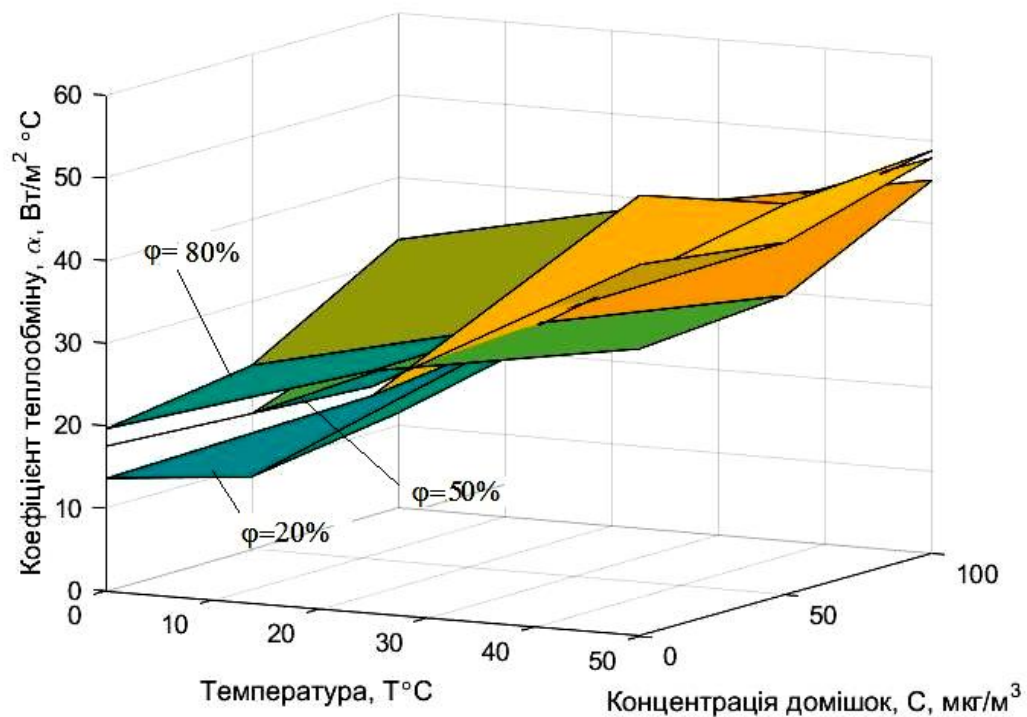


Рис. 2.5. Поверхні залежностей коефіцієнту теплообміну від температури навколишнього середовища, концентрації твердих домішок у повітрі, за різних значень відносної вологості

Таким чином, на основі проведеного експериментально-статистичного дослідження методом планування багатofакторного експерименту та

аналізуючи отримані залежності (рис. 2.5), уточнено раціональні діапазони параметрів навколишнього середовища (відносної вологості, температури, концентрації твердих домішок у повітрі), при яких коефіцієнт тепловіддачі набуває найменших значень.

Як можна побачити із залежностей (рис. 2.5), із збільшенням відносної вологості понад 90 %, утриманням температури навколишнього середовища на рівні менше 30 °С та концентрації у повітрі твердих домішок понад 70 мкг/м³, коефіцієнт теплообміну досягає раціональних значень $\alpha_{\text{ФТС}}$, які становлять порядку 70 – 77 Вт/(м²·°С) та вище, що є найбільш раціональним режимом при заданих умовах. Зменшення концентрації твердих домішок до 50 мкг/м³, веде до зменшення коефіцієнту теплообміну $\alpha_{\text{ФТС}}$ до 45 Вт/(м²·°С), а з одночасним зменшенням температури до 10 °С, $\alpha_{\text{ФТС}}$ починає підвищуватися до 65 Вт/(м²·°С).

З іншого боку, зі збільшенням температури, відносної вологості та концентрації твердих домішок в повітрі, коефіцієнт тепловіддачі прямує до максимуму.

Таким чином, за найбільш раціональні значення відносної вологості від 82 % та при діапазоні значень концентрації у повітрі твердих домішок в межах 63–78 мкг/м³. При цьому діапазон значень коефіцієнта тепловіддачі складає 70,44 – 77,86 Вт/(м²·°С). Подальше збільшення концентрації у повітрі твердих домішок призводить до занадто великих (недопустимих) значень коефіцієнту тепловіддачі, що знаходяться за межами робочих параметрів зовнішніх умов. Вихід за рамки цього діапазону під час обрання робочих параметрів зовнішніх умов веде до великих похибок при оцінюванні вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій, що суттєво (на 30%) знижує вогнестійкість вогнезахисених залізобетонних конструкцій, як основного матеріалу, що чинить опір тепловому впливу пожежі.

2.2 Структурно-логічна схема розрахунково-експериментального методу

Відповідно до розробленої моделі фізичних процесів, що відбуваються в системі «залізобетонна конструкція – вогнезахисне покриття», та математичної моделі розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій є способом аналізу, оптимізації та прогнозування досліджуваних процесів тепломасообміну у вогнезахищених залізобетонних конструкціях на основі комп'ютерної чисельної (розрахункової) моделі, адекватність якої забезпечено шляхом параметричної або структурної ідентифікації за допомогою експериментальної інформації про досліджуваний процес і розв'язання обернених задач теплопровідності. Основою методу є математична (розрахункова, чисельна) модель досліджуваного фізичного процесу, а експеримент (експериментальні дані) є допоміжною складовою, необхідною для забезпечення адекватності обраної моделі [217].

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

1. Розрахункова (комп'ютерна реалізація розробленої математичної моделі) модель фізичного процесу.
2. Експериментальні дані, необхідні для забезпечення адекватності моделі процесу.
3. Ідентифікація параметрів обраної моделі процесу з метою забезпечення її адекватності.
4. Адекватна модель, яка в подальшому використовується для вирішення поставлених завдань аналізу, оптимізації або прогнозування досліджуваного фізичного процесу.

У підсумку розрахунково-експериментальний метод складається із компонентів, представлених на рис. 2.6 [218].

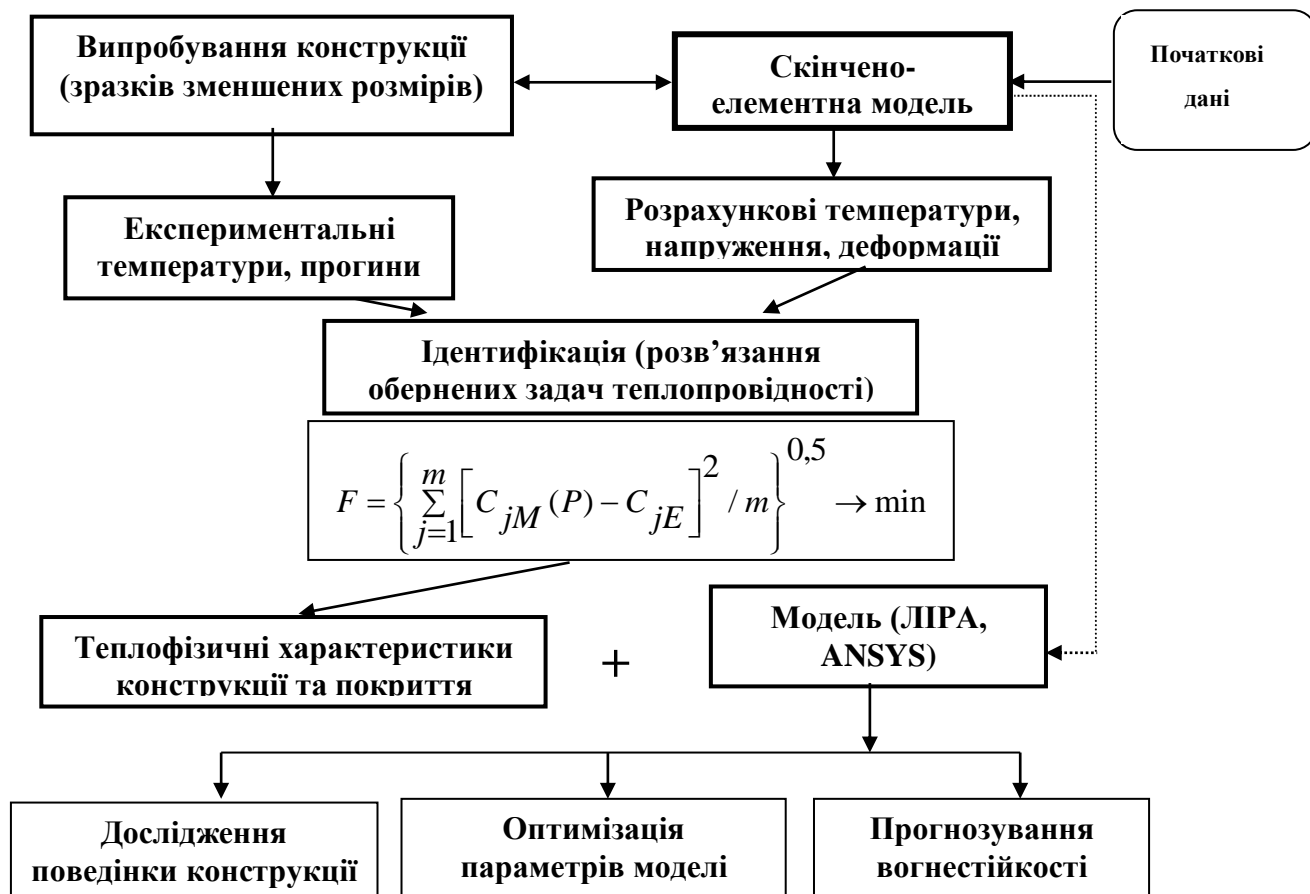


Рис. 2.6 Схема розрахунково-експериментального методу

При використанні розробленого методу доцільно використовувати спосіб, заснований на розв'язанні тестових задач теплопровідності. При цьому застосовується обчислювальний експеримент, що дозволяє обґрунтувати оптимальні значення параметрів складових розрахункового-експериментально методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій (оптимізація). Це може бути обґрунтування мінімальної кількості зразків залізобетонної конструкції при її випробуванні на вогнестійкість, схеми вимірювання температур у зразку та деформацій зразка, що дозволяють ідентифікувати характеристики матеріалу конструкцій і вогнезахисного покриття та параметрів, що використовуються при розв'язанні обернених задач теплопровідності. Оптимізація моделі полягає в обґрунтуванні значень параметрів складових розрахункового-експериментально методу розв'язанням тестових задач теплопровідності, в яких випробування конструкції на

вогнестійкість замінюється обчислювальним експериментом. В якості критерію при оцінці оптимальності доцільно використовувати умову мінімуму середньоквадратичного відхилення розрахункових від точних значень межі вогнестійкості вогнезахисної залізобетонної конструкції.

Як видно із рис. 2.6, досліджуваний об'єкт і математична модель, що описує основні фізичні процеси, що відбуваються в об'єкті, дозволяють отримувати відповідно експериментальну характеристику температур (T_E) і розраховувати модельну характеристику властивостей (T_M). У свою чергу ці характеристики залежать від ряду вхідних параметрів P фізичного або технологічного характеру. У нашому випадку до таких параметрів P відносяться теплофізичні характеристики бетону і вогнезахисного покриття – теплопровідність і теплоємність. Параметри P , як правило, невідомі, і їх визначення можливе за допомогою розв'язання обернених задач теплопровідності за даними експериментальних вимірювань T_E .

Отримані розв'язанням обернених задач теплопровідності параметри P досліджуваного процесу використовувалися на основі тієї ж моделі для вирішення основних інженерних задач аналізу – оптимізації параметрів або прогнозу (рис. 2.5). У нашому випадку – для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. Розв'язання ж обернених задач є допоміжною процедурою, яка покликана забезпечити адекватність обраної моделі фізичним процесам, що розглядаються [219].

Структурно-логічна схема розробленого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій і методика його застосування зображені на рис. 2.7.



Рис. 2.7 Структурно-логічна схема розрахунково-експериментального методу і процедура його реалізації

Таким чином, структурно-логічна схема розрахунково-експериментального методу складається з наступних етапів (рис. 2.7):

1. Розробка моделі фізичних процесів і математичної моделі теплового стану вогнезахищених залізобетонних конструкцій.

2. Проведення випробувань на вогнестійкість чи натурних вогневих випробувань (частина конструкції або зразок зменшених розмірів), що зводяться до вимірювань температур на зразках конструкції і деформації зразків (для несучих конструкцій) у вогневій печі при заданих температурних режимах пожежі.

3. Ідентифікація за даними випробувань на вогнестійкість теплофізичних характеристик моделі на основі розв'язання обернених задач теплопровідності.

4. Використання теплофізичних характеристик і моделей для визначення характеристик вогнезахисної здатності покриттів вогнезахисних залізобетонних конструкцій за результатами випробувань на вогнестійкість при різних умовах випробувань (температурні режими пожежі, умови закріплення, навантаження зразків, схема вимірювання температур) [220].

Розглянутий вище підхід можна визначити як сукупність моделей, обладнання, методик, методів, що складають методологію дослідження, і як спосіб (засіб) досягнення мети.

2.3 Перевірка працездатності запропонованого розрахунково-експериментального методу

В даному підрозділі була проведена робота щодо виявлення взаємозв'язку між параметрами пасивного вогнезахисного покриття (на прикладі складу «Неоспрей») та вогнестійкістю вогнезахисного багатопустотного залізобетонного перекриття як наукового підґрунтя для їхнього застосування в будівництві за допомогою розробленого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій.

Визначення вогнестійкості вогнезахисних багатопустотних залізобетонних перекриттів здійснювалося відповідно до [221] і полягало у визначенні проміжку часу від початку випробування за стандартним температурним режимом [222] зразків перекриттів при вогневому впливі на зразок знизу до настання одного з нормованих граничних станів за ознаками втрати цілісності, несучої здатності або теплоізолювальної здатності.

Випробуванням піддавалися два зразки вогнезахисних багатопустотних залізобетонних плит перекриття ПК 48-12-8 розмірами 4780×1190 мм та товщиною 220 мм. Плита мала несучий сталевий каркас, який складався з

п'ятьох нижніх повздовжніх несучих арматурних стрижнів 12 мм (марка не надана) та арматурної проволочки 4 мм Вр1. Бетон С12/15. Середнє значення товщини захисного шару бетону до нижньої несучої арматури складало 20 мм. Межа вогнестійкості плити за даними виробника становила REI 45. На зразки знизу та з боків плит за допомогою агрегату наносили шар речовини із вогнезахисного покриття (штукатурки) середньою товщиною 25,5 мм.

Зразки встановлювали на горизонтальній печі (статично невизначена схема обпирання) з обпиранням по краях через компенсуючі опори з базальтових плит товщиною 40 мм.

Навантаження здійснено каліброваними вантажами у вигляді бетонних блоків, які встановлювалися на зразках через компенсуючі опори. Фактичне навантаження на зразки встановлено, виходячи зі створення у плитах напруг, що відповідають напругам від питомого розподільчого навантаження 570 кг/м^2 .

Згідно з [222] визначено граничне значення прогину зразків, яке складає 220 мм (прогін $b=4400$ мм, розрахункова товщина плит 220 мм), а граничне значення швидкості наростання деформації – 9,8 мм/хв. Для вимірювання середньої та максимальної температури з необігрівної поверхні кожного зразка було встановлено по 5 хромель-алюмелевих термопар. Одна термопара у центрі зразка та чотири в геометричних центрах чвертей зразка. Для випробувань використовувалася горизонтальна випробувальна піч і засоби вимірювальної техніки, які наведено в табл. 2.4. (згідно протоколу випробувань № 5/СПР-12 від 30.11.2012).

Таблиця 2.4

Засоби вимірювальної техніки

№ з/п	Найменування засобів	Заводський номер	Діапазон вимірювання	Похибка вимірювань
1	Лінійка металева	–	від 0 до 1000 мм	± 1 мм
2	Рулетка металева	–	від 0 до 5000 мм	± 1 мм
3	Секундомір	8826	від 0 до 60 с від 0 до 60 хв	$\pm 0,4$ с ± 1 с

Продовження табл. 2.4

4	Прилад контролю надлишкового тиску в печі ТНЖ-Н	24723	від 0 до 100 Па	Кл. 1,5
5	Термопары ТХА, 16 одиниць	–	від 0 до 334 °С від 334 до 1300 °С	$\pm 2,5$ °С $\pm 0,0075 \times T_{\text{вим}}$, °С
6	Психрометр аспіраційний МВ-4М	18358	від 10 до 100 % від -25 до 50 °С	± 3 % $\pm 0,2$ °С
7	Штангенциркуль	Б205755	від 0 до 250 мм	Ц.п. 0,05 мм
8	Вимірювально-реєструючий комплекс «TEST-SERT»	1	від 0 до 1300 °С	$\pm (0,5 + 0,0009T)$ °С ± 1 с

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

Результати вимірювань температур у вогневій печі наведені на рис. 2.8, а з необігрівної поверхні вогнезахищеного залізобетонного перекриття – на рис. 2.9.

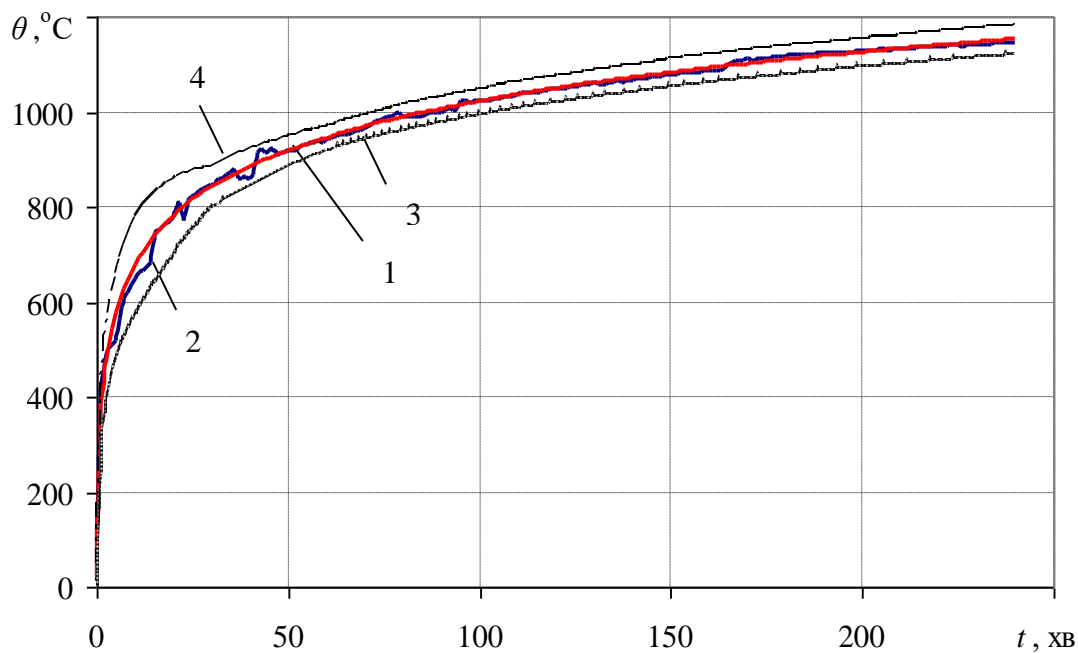


Рис. 2.8 Залежність температури в печі від часу вогневого впливу на обігрівній поверхні вогнезахищеної залізобетонної багатопустотної плити

перекриття товщиною 220 мм: 1 – крива стандартного температурного режиму; 2 – реальна крива зміни температури в печі; 3 – допустимі при випробуваннях мінімальні значення температури в печі; 4 – допустимі при випробуваннях максимальні значення температури в печі

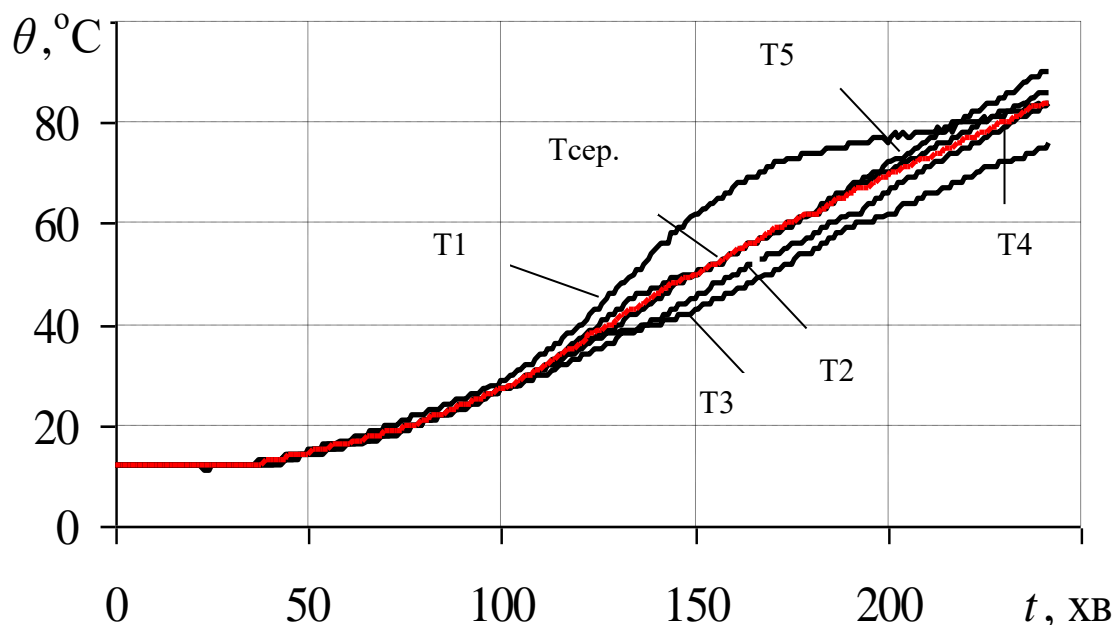


Рис. 2.9 Залежність температури від часу вогневого впливу з необігрівної поверхні вогнезахищеного багатопустотного залізобетонного перекриття в різних місцях вимірювання температури

Дані, отримані в результаті випробувань на вогнестійкість (рис. 2.8, 2.9), в подальшому, згідно математичної моделі та запропонованого методу, використовувались для визначення теплофізичних характеристик покриття, що досліджувалось [208].

Для цього обрали двовимірну математичну модель теплового стану вогнезахищеного залізобетонного перекриття, що являє собою рівняння теплопровідності з урахуванням променистого теплообміну і граничними умовами III-го роду на обігрівній поверхні та граничними умовами III-го роду з необігрівної поверхні.

Використовувався пакет прикладних програм FRIEND-2, який дозволяє визначати теплофізичні характеристики вогнезахисних покриттів залізобетонних конструкцій, а також інші параметри теплообмінних процесів за результатами нестационарних вимірювань температур всередині або на поверхні зразків, теплових потоків, значень температури середовищ або коефіцієнтів тепловіддачі [2].

Для визначення необхідної товщини досліджуваного вогнезахисного покриття залізобетонних конструкцій спочатку були знайдені теплофізичні характеристики бетону (рис. 2.10) вогнезахисеного перекриття методом розв'язання обернених задач теплопровідності, які найбільш ефективно вирішуються на основі одновимірних 1D-моделей. Для цього використовувалася 1D еквівалентна модель теплового стану конструкції в програмному середовищі FRIEND [223, 224].

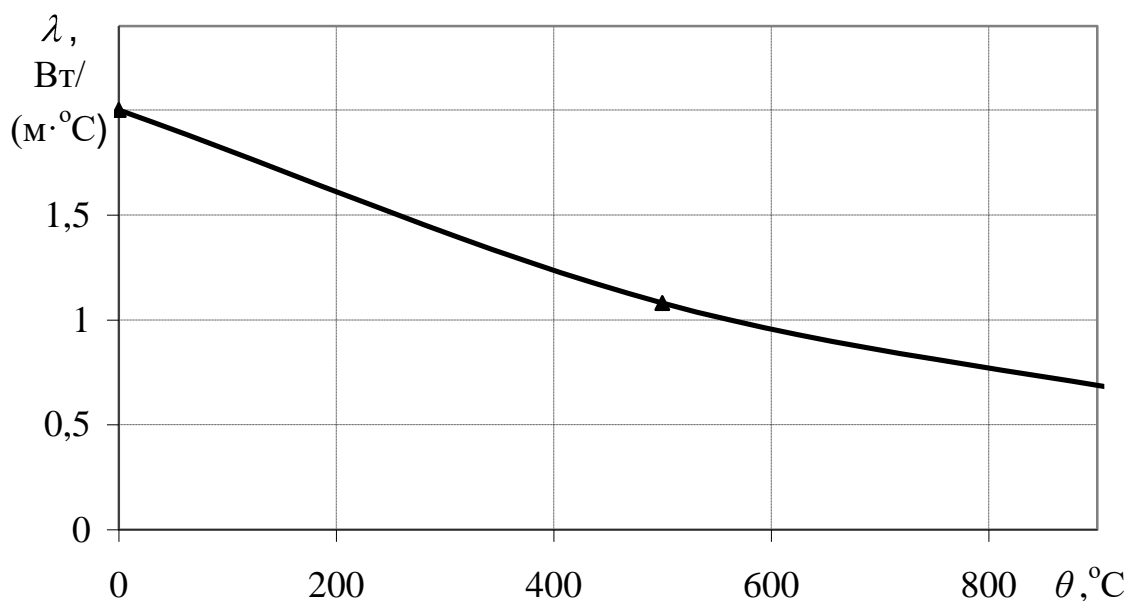


Рис. 2.10 Залежність ефективного коефіцієнта теплопровідності бетону вогнезахисеного залізобетонного багатопустотного перекриття від температури, отримана в результаті розв'язання обернених задач теплопровідності за даними випробувань на вогнестійкість

Використовуючи знайдені залежності (рис. 2.10) в подальшому були проведені розрахунки з визначення теплофізичних характеристик штукатурного складу (рис. 2.11), які залежать від температури. Хоча, згідно даних фірми-виробника, коефіцієнт теплопровідності досліджуваного покриття в сухому стані дорівнює $0,11 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ при 20°C . Проте, зрозуміло, що для більшості вогнезахисних матеріалів теплофізичні характеристики температури змінюються під час нагрівання внаслідок фізико-хімічних процесів у них [225].

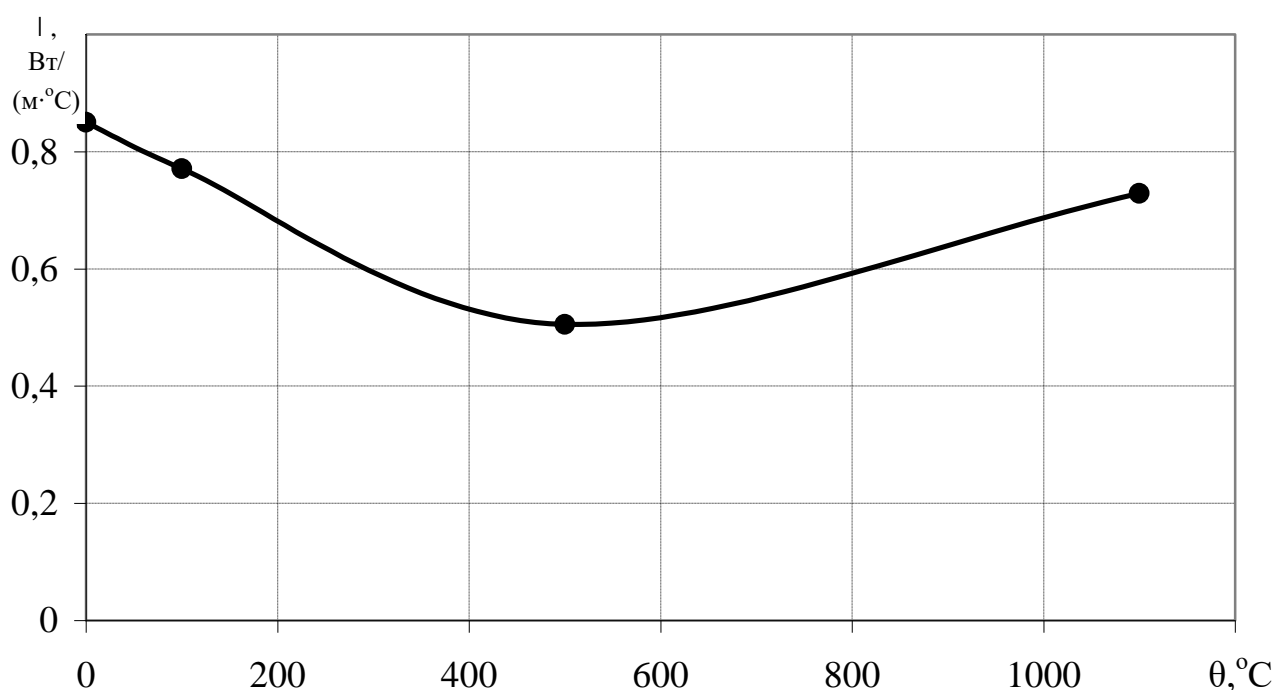


Рис. 2.11 Залежність ефективного коефіцієнта теплопровідності пасивного вогнезахисного покриття від температури, знайденого розв'язанням обернених задач теплопровідності за даними випробувань на вогнестійкість вогнезахисного багатопустотного залізобетонного перекриття

Як видно з рис. 2.11, в діапазоні температур від 0°C до приблизно 500°C значення коефіцієнта теплопровідності досліджуваного штукатурного покриття лінійно падає і проходить через мінімальне значення $0,5 \text{ Вт}/\text{м}\cdot^\circ\text{C}$ (за температури 500°C), що можна пояснити зниженням густини і збільшенням пористості покриття за рахунок видалення хімічно зв'язаної вологи. Зростання

коефіцієнту теплопровідності в діапазоні температур від 500 °С до 1100 °С можна пояснити появою радіаційної складової в порах покриття в поєднанні з його високотемпературною усадкою.

При цьому критерій (2.13) склав 0,8 °С, а розрахункові і експериментальні температури показано на рис. 2.12.

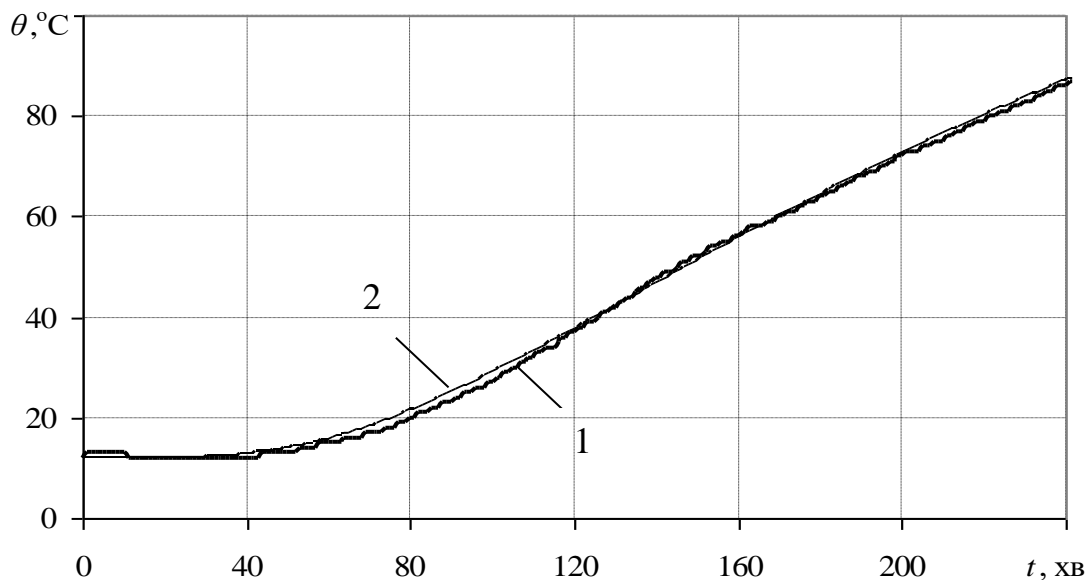


Рис. 2.12 Залежність температури від часу вогневого впливу з необігрівної поверхні вогнезахищеного залізобетонного перекриття: 1 – експериментальна температура з необігрівної поверхні; 2 – розрахункова температура, отримана розв'язанням обернених задач теплопровідності

В процесі знаходження теплофізичних характеристик покриття задавали питому об'ємну теплоємність штукатурного покриття постійною і рівною $C_v=1 \cdot 10^6$ Дж/м³·°С, а коефіцієнт теплопровідності розраховували як функцію від температури. Теплофізичні характеристики шарів бетону використовували знайдені раніше (рис. 2.10).

Для оцінювання та прогнозування вогнестійкості вогнезахищених багатопустотних залізобетонних перекриттів необхідно знати, яка товщина вогнезахисного штукатурного покриття забезпечує нормовану межу

вогнестійкості цього перекриття. Для цього використано характеристики, знайдені вище: теплофізичні характеристики бетону (рис. 2.10) та штукатурного покриття (рис. 2.11).

Така залежність називається характеристикою вогнезахисної здатності покриття і визначається як залежність товщини вогнезахисного покриття від товщини захисного шару бетону (відстань між поверхнею нагрівання і прилеглими арматурними стрижнями), за яких забезпечується нормована межа вогнестійкості вогнезахищеного залізобетонного перекриття для граничних станів з вогнестійкості за ознакою втрати теплоізолювальної здатності або досягнення арматурою критичної температури при заданому в випробуванні рівні навантаження [226].

На основі розробленого методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій розв'язанням серії прямих задач теплопровідності, була знайдена залежність товщини вогнезахисного покриття від товщини захисного шару бетону для нормованих значень меж вогнестійкості вогнезахищеного багатопустотного залізобетонного перекриття (рис. 2.13).

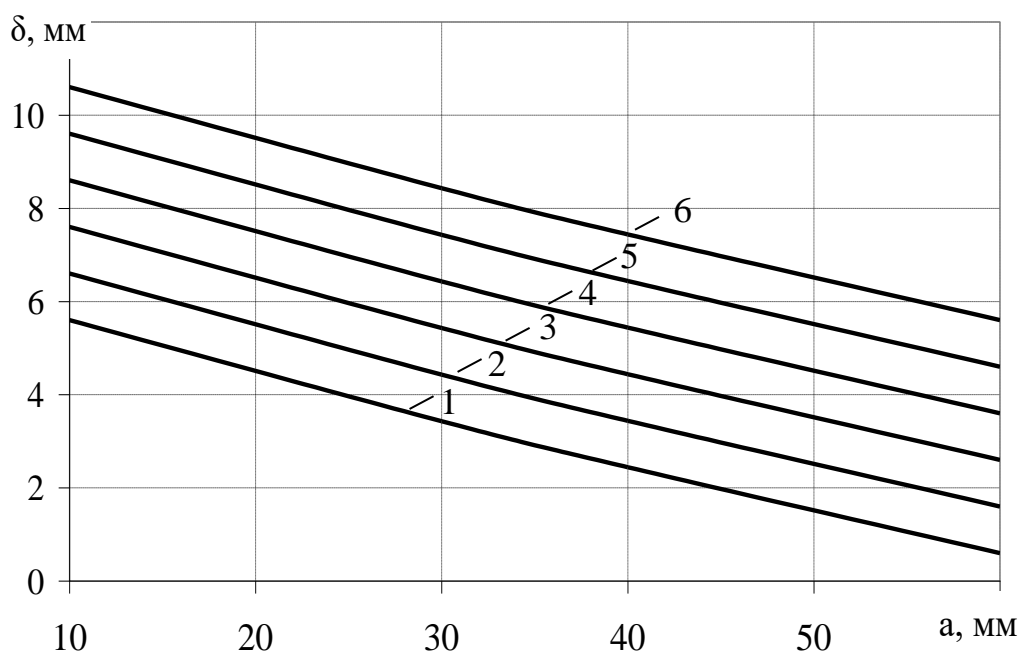


Рис. 2.13 Залежність товщини (δ) вогнезахисного покриття від товщини захисного шару бетону залізобетонного перекриття (a) за критерієм досягнення

критичної температури арматури (500 °С) для межі вогнестійкості: 1 – 60 хвилин; 2 – 90 хвилин; 3 – 120 хвилин; 4 – 150 хвилин; 5 – 180 хвилин; 6 – 240 хвилин

За допомогою отриманої залежності можливо визначати товщину вогнезахисного штукатурного покриття в залежності від товщини захисного шару бетону для необхідної межі вогнестійкості вогнезахищеної залізобетонної конструкції, при якому настає граничний стан конструкції з вогнестійкості за ознакою досягнення арматурою критичної температури при заданому рівні навантаження або теплоізолювальної здатності [227]. Слід зазначити, що точність визначення характеристики вогнезахисної здатності оцінюється в 16 % і може бути вищою, якщо застосовувати додаткові вимірювання температур не тільки з необігрівної поверхні, але і на арматурі, під вогнезахисним покриттям і в середині перекриття [228].

Таким чином, дослідження взаємозв'язку між параметрами пасивного вогнезахисного покриття (на прикладі складу «Неоспрей») та вогнестійкістю вогнезахищеного багатопустотного залізобетонного перекриття в цілому підтвердило працездатність розробленого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій. Перевагою запропонованого методу є можливість оцінювання вогнестійкості вогнезахищених і незахищених залізобетонних конструкцій та вогнезахисну здатність покриттів. Цей метод в порівнянні з експериментальним чи розрахунковим є економічним. Дозволяє за результатами одного або декількох експериментів (вогневих випробувань), використовуючи розроблені математичні моделі, оцінювати вогнестійкість конструкцій та вогнезахисну здатність покриттів. Результати дослідження будуть корисними для проектувальників, виробників вогнезахисних речовин, оскільки дозволяють розраховувати необхідну товщину покриттів, яка забезпечує нормовану межу вогнестійкості при заданій товщині захисного шару бетону конструкцій будівель та споруд.

2.4 Процедура реалізації розрахунково-експериментального методу на масштабованих зразках

Представлені результати визначення прогнозованого строку придатності вогнезахисних покриттів вогнезахисних будівельних конструкцій за методикою проведення прискорених випробувань та експериментальне визначення вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів після кліматичних випробувань (на прикладі вогнезахисного покриття на водній основі «Фенікс СТС»). Виокремлено перелік проблемних питань, що мають місце під час визначення вогнезахисної здатності покриттів після впливу кліматичних чинників. Запропоновано методику досліджень вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів після впливу кліматичних факторів.

2.4.1 Визначення впливу кліматичних факторів та температурного режиму пожежі

Для врахування впливу кліматичних факторів на вогнезахисну здатність вогнезахисних покриттів запропоновано застосувати методику, що включає експериментальні та розрахункові операції, послідовність яких відповідає структурно-логічній схемі, зображеній на рис. 2.14.

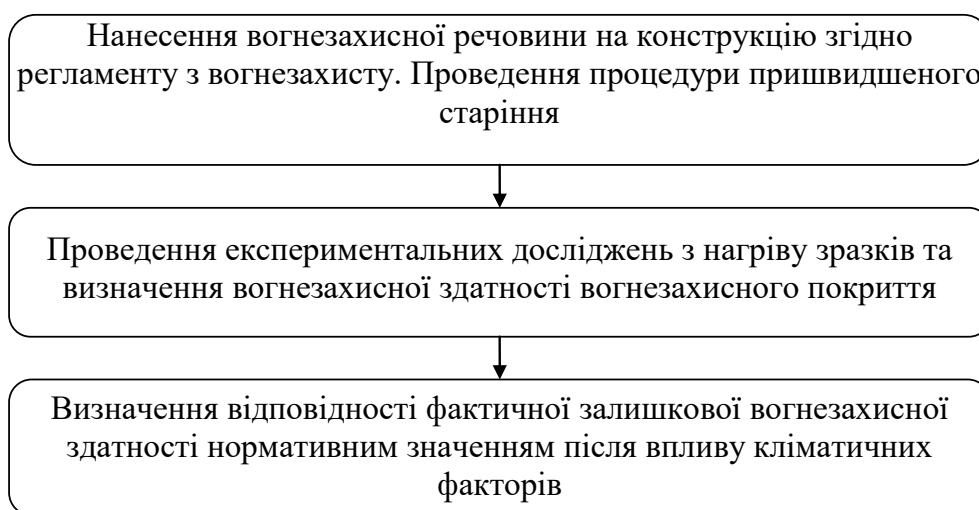


Рис. 2.14 Структурно-логічна схема методики дослідження довговічності вогнезахисних покриттів

Сутність запропонованої методики полягає у визначенні вогнезахисної ефективності вогнезахисних покриттів, які зазнали впливу кліматичних факторів з подальшим їх порівнянням з відповідними значеннями вогнезахисних покриттів, які не зазнали подібного впливу.

Визначення прогнозованого строку придатності вогнезахисних покриттів запропоновано виконувати в 2 етапи. На першому етапі необхідно отримати зістарені зразки вогнезахисних покриттів, на другому – визначити залишкову вогнезахисну здатність покриття та порівняти її з нормативними значеннями для встановлення ефективності.

Для отримання зістарених зразків вогнезахисних покриттів використовуються дві методики: методика натурних випробувань вогнезахисних покриттів (старіння відбувається під дією природного середовища) та методика прогнозування терміну придатності вогнезахисного покриття за результатами пришвидшених кліматичних випробувань, які виконують в спеціальних (кліматичних) камерах. Суть пришвидшених випробувань полягає в створенні в кліматичній камері циклічного впливу річної кількості кліматичних факторів заданого регіону. За існуючими методиками передбачається різна кількість пришвидшених кліматичних циклів, які відповідають 1 року реального впливу кліматичних факторів.

У зв'язку з тим, що на ринку з'являються нові виробники вогнезахисної продукції, які пропонують принципово нові підходи до питань вогнезахисту, а також життєвий цикл більшості вогнезахисних покриттів є меншим гарантійного терміну зберігання їх вогнезахисних властивостей, стає очевидним, що потрібно надавати перевагу методикам прогнозування терміну придатності вогнезахисних покриттів, які базуються на пришвидшених кліматичних випробуваннях.

Існуючі підходи з визначення вогнезахисної здатності зістарених покриттів передбачають врахування великої кількості показників, хоча деякі з них навіть не відносяться до вогнезахисних властивостей. Проте більшість дослідників схиляється до того, щоб розглядати основним критерієм, який характеризує

збереження нормативних вогнезахисних властивостей – це відповідність їх фактичної вогнезахисної здатності нормативним значенням.

Сутність методики дослідження полягала в експериментальному визначенні нестационарного прогріву вогнезахисних конструкцій у вигляді масштабованих зразків зменшених розмірів при умові вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі згідно з ДСТУ Б В.1.1-4-98*. В якості основи для зразків зменшених розмірів використовувалися сталеві пластини розмірами 500×500 мм з мінімальними та максимальними товщинами (5 мм і 10 мм), з нанесеною вогнезахисною речовиною, що утворює на поверхні вогнезахисне покриття, з трьома значеннями товщини покриття: мінімальним, середнім та максимальним. З необігрівної поверхні зразків встановлювався шар теплоізоляції. За експериментальними даними для кожного моменту часу вимірювання визначали температуру вогнезахисної пластини, як середнє арифметичне значення показників термодатчиків, які розміщено з необігрівної поверхні.

Для дослідження впливу кліматичних факторів на вогнезахисні властивості вогнезахисного покриття проведено вогневі випробування вогнезахисних конструкцій, використовуючи зразки зменшених розмірів. Підготовлено 4 пластини (рис. 3.6,а), розмірами 500×500 мм та товщинами 5 і 10 мм з нанесеною на одну поверхню пластини вогнезахисною речовиною (рис. 2.15, б). З обігрівної поверхні пластини перед нанесенням вогнезахисної речовини був нанесений шар ґрунту ГФ-021, товщиною 0,065 мм.



a

б

Рис. 2.15 Вигляд зразків: *a* – до нанесення вогнезахисної речовини; *б* – після нанесення вогнезахисної речовини

Вогнезахисна речовина наносилась згідно технології виробника механізованим способом агрегатом безповітряного розпилення на конкретну поверхню з дотриманням всіх вимог (рис. 2.15, б). Дві пластини з чотирьох були контрольними і не піддавались дії кліматичних факторів.

Для вимірювання товщини утвореного вогнезахисного покриття використовували товщиномір, яким було здійснено вимірювання в 9 точках, середня товщина склала 0,31 мм.

На першому етапі було проведено пришвидшене штучне старіння пластин з утвореним вогнезахисним покриттям в кліматичній камері. Другий етап полягав у вогневих випробуваннях вогнезахищених пластин із зістареним покриттям і порівняння даних з контрольними зразками.

Сутність кліматичних випробувань полягала в циклічному відтворенні температурного і вологісного режимів в камері за відповідною методикою, в ході яких відбувається вісім повторень даного циклу, який відповідає 1 року служби вогнезахисного покриття в реальних кліматичних умовах.

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

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

Вісім повторень цього циклу відповідає 1 року служби вогнезахисного покриття в реальних умовах.

В результаті процедури пришвидшеного старіння отримано зразки, які зістарені на 1 та 3 роки відповідно.

В процесі пришвидшеного старіння помічено не значне «змивання» вогнезахисного покриття з поверхні вогнезахищеної пластини.

Наступним етапом було проведення вогневих випробувань вогнезахищених пластин після витримки у кліматичній камері і порівняння даних з контрольними зразками.

Для вимірювання температури з необігрівної поверхні пластини було встановлено 3 термопари типу ТХА (рис. 2.16) з діаметром дроту 0,5 мм (Т1–Т3), одна термопара (Т2) у центрі зразка та дві (Т1, Т3) на відстані 100 мм від країв пластини. Спаї термопар зачеканені в зразок на глибину 2 мм та прикріплені теплоізолювальним матеріалом.



Рис. 2.16 Схема розміщення термопар з необігрівної поверхні пластини перед випробуванням

З необігрівної поверхні пластини була захищена двома шарами мулітокремнеземового фетру, товщиною 20 мм, та плитою мінеральної вати, густиною 75 кг/м^3 і товщиною 50 мм (рис. 2.17).



Рис. 2.17 Вигляд зразка з необігрівної поверхні пластини

Випробування проводились при температурі повітря $15,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, відносній вологості повітря 48% та тискові 743 мм. рт. ст.

Суть випробування полягала у створенні стандартного температурного режиму в печі за рахунок спалювання рідкого пального (рис. 2.18). Вогнева піч призначена для створення вогневого впливу на зразок за стандартним температурним режимом пожежі, що монтується вертикально у отворі печі. Температурний режим в печі забезпечується спалюванням дизельного пального.

Температуру в печі контролювали за допомогою термоелектричних перетворювачів (термопар типу ТХА). Після початку випробування і до його закінчення надлишковий тиск в печі складав 10 Па . Під час випробування дослідний зразок піддавався тепловій дії, а також визначався час від початку такої дії до досягнення температури $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ з необігрівної поверхні пластини.

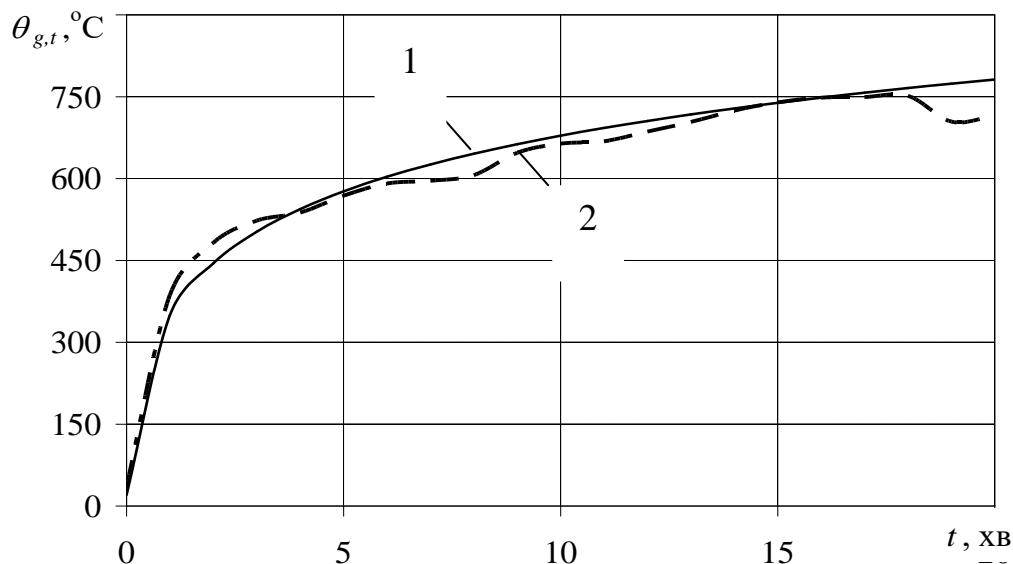


Рис. 2.18 Залежність температури в печі від тривалості вогневого впливу:
1 – крива стандартного температурного режиму, 2 – реальна крива зміни температури в печі

Для випробувань застосовувались такі технічні засоби:

- випробувальна піч;
- засоби вимірювальної техніки;
- опорна конструкція для зразків.

Випробувальна піч та засоби вимірювальної техніки відповідали [246].

Опорна конструкція – залізобетонна плита з одним чи декількома квадратними отворами розміром 450 ± 10 мм під зразки, що випробуються. Товщина опорної конструкції в місці встановлення зразків складала 60 мм.

Температура з необігрівної поверхні при цьому за 17 хвилин випробувань досягла критичної температури для пластини (550 °C) (рис. 2.19).

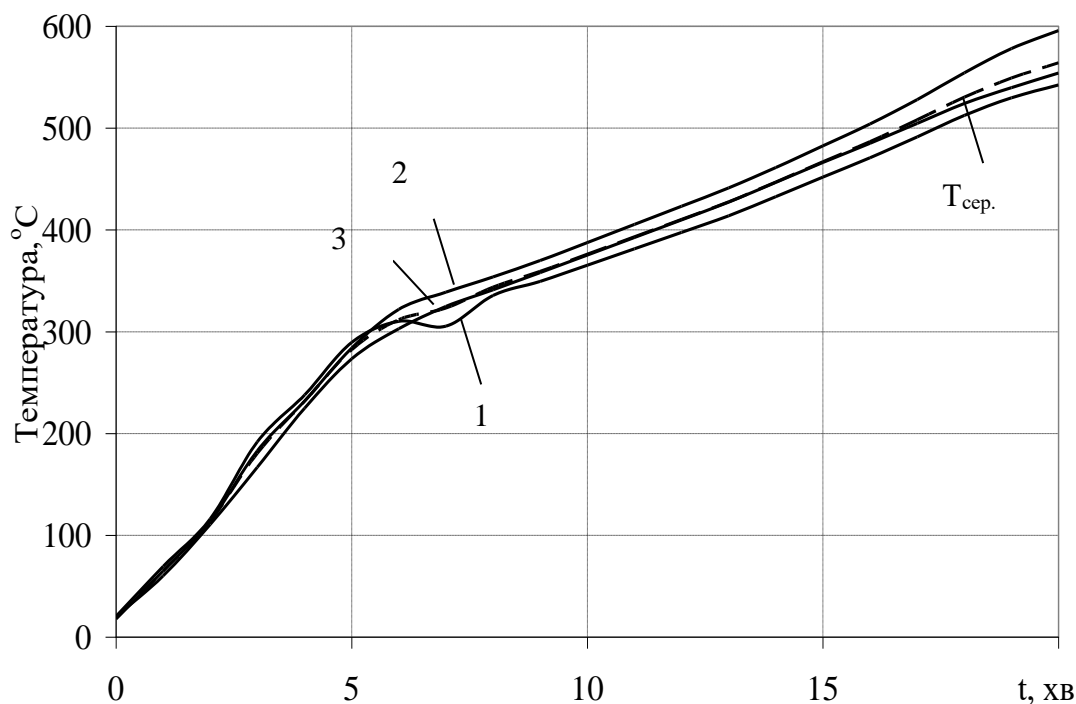


Рис. 2.19 Залежність температури з необігрівної поверхні вогнезахищеної пластини зразка №1 від часу вогневого впливу в різних точках вимірювання температур: 1 – термопара, встановлена на відстані 100 мм від верхнього краю пластини; 2 – термопара, встановлена по центру пластини; 3 – термопара, встановлена на відстані 100 мм від нижнього краю пластини; $T_{сер.}$ – середнє значення показників трьох термопар

Досягнення критичної температури ($550\text{ }^{\circ}\text{C}$) з необігрівної поверхні контрольних пластин та пластин із зістареним вогнезахисним покриттям відбулося майже одночасно. Ці результати збігаються з даними виробника щодо терміну придатності покриття та свідчать про адекватність розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій при його застосуванні для масштабованих зразків.

Вигляд зразків після проведення вогневих випробувань показано на рис. 2.20.



Рис. 2.20 Характерний вигляд вогнезахисного покриття після кліматичного та вогневого впливу

Після випробувань при візуальному огляді зразків встановлено:

- вогнезахисна речовина, нанесена на пластину, розмірами $500 \times 500 \times 5$ мм з ґрунтом ГФ-021 (товщина 0,065 мм), має задовільну адгезійну міцність;
- відшарування утвореного покриття від пластини за площею не спостерігалось;
- середня товщина вогнезахисного покриття після проведення випробувань склала 12 мм.

Отримані дані (температури з необігрівної поверхні вогнезахисної пластини) використовували при розв'язанні обернених задач теплопровідності. В результаті розрахунків визначені теплофізичні характеристики вогнезахисного покриття: залежність коефіцієнту теплопровідності від температури (рис. 2.21) та постійне значення питомої об'ємної теплоємності 10^5 Дж/м³·°С. Обернена задача теплопровідності розв'язувалась екстремальним методом, що заснований на використанні ітераційного методу Ньютона-Гауса пошуку мінімуму функції F і методу регуляризації Тихонова А. М.

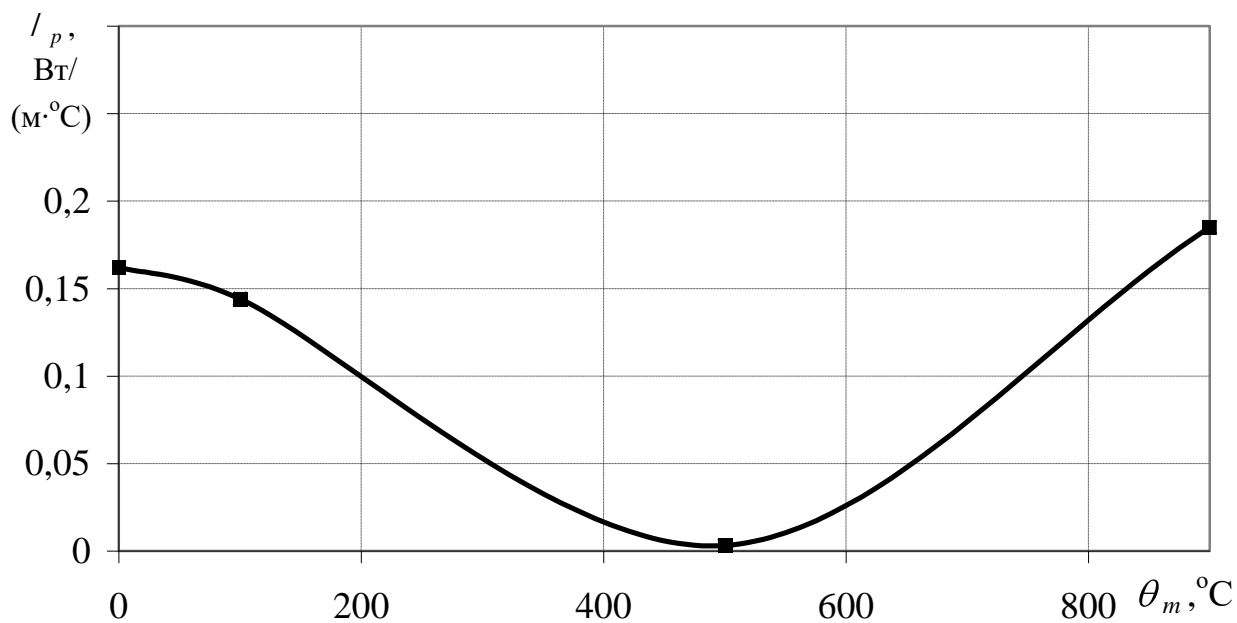


Рис. 2.21 Залежність ефективного коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття від температури, знайдена розв'язанням оберненої задачі теплопровідності

Криву отриманої залежності коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття від температури можна пояснити наступним чином (рис. 2.21). Значення коефіцієнта теплопровідності від початкової температури до $500\text{ }^\circ\text{C}$ лінійно спадає, що пояснюється збільшенням товщини вогнезахисного покриття в десятки разів по відношенню до початкової товщини. Лінійне зростання після $500\text{ }^\circ\text{C}$ викликане збільшенням променевої складової коефіцієнта теплопровідності і його кондуктивної складової (внаслідок усадки (спікання) коксового шару покриття і часткового руйнування).

Використовуючи знайдені теплофізичні характеристики покриття розв'язанням серії прямих задач теплопровідності визначається залежність мінімальної товщини досліджуваного покриття від товщини вогнезахисної пластини, нормованої тривалості вогневого впливу та критичної температури конструкції.

В результаті проведених досліджень встановлено, що вплив, який відповідає 3-ом рокам експлуатації, не впливає на теплофізичні характеристики досліджуваного покриття, а отже й вогнезахисну здатність.

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

2.4.2 Визначення впливу температурних режимів пожежі (на прикладі температурного режиму вуглеводневої пожежі)

Вогнестійкість вогнезахисних будівельних конструкцій та їх елементів нормується і визначається випробуваннями на вогнестійкість при стандартному температурному режимі пожежі, що не завжди задовольняє сучасним вимогам пожежної безпеки до будівель і споруд.

Для підтвердження вогнестійкості в умовах більш інтенсивного впливу, чим при стандартному температурному режимі, використовуються різні режими, в тому числі і вуглеводневий режим пожежі.

Для правильного визначення характеристики вогнезахисної здатності покриттів будівельних конструкцій для температурного режиму вуглеводневої пожежі, необхідно провести вогневі випробування цієї конструкції з визначеним вогнезахисним покриттям саме при цьому режимі пожежі. При цьому дані, отримані при проведенні таких вогневих випробувань (температури), використані для знаходження теплофізичних характеристик покриття.

Для цього в роботі пропонується застосувати розроблений розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій.

До основних труднощів при визначенні вогнезахисної здатності покриттів вогнезахисних залізобетонних конструкцій при різних температурних режимах пожежі слід віднести:

– залежність характеристик вогнезахисного покриття вогнезахисних конструкцій від темпу нагріву самого покриття, що в свою чергу залежить від режиму пожежі (рівня і темпу зміни температури) і товщини конструкції;

– залежність теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів від темпу нагріву самого покриття з тих же причин;

– проведення випробувань на вогнестійкість вогнезахисних будівельних конструкцій при режимах пожежі, відмінних від стандартного (нормами не передбачено проведення таких випробувань, тому фірми-виробники покриттів не проводять таких випробувань);

– у разі застосування розрахункових методів визначення вогнезахисної здатності покриттів вогнезахисних конструкцій, постає питання про використання теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів, які були визначені саме при заданому температурному режимі пожежі.

Вогнезахисне оброблення конструкції полягало у нанесенні на підготовлену поверхню масштабованого зразка антикорозійного ґрунту ГФ-021 та вогнезахисної речовини.

Для підготовки поверхні для антикорозійного покриття використовувалися методи абразивного очищення, промивання струменем води під тиском, очищення від пилу стисненим повітрям. Рекомендований рівень очистки поверхні конструкції характеризується тим, що при візуальному огляді неозброєним оком підготовлена поверхня повинна бути вільна від масел, змазки, бруду, прокатної окалини, іржі, фарби та сторонніх часток.

Проміжок часу між підготовкою поверхні й нанесенням антикорозійного покриття не перевищував 24 годин у приміщенні і 6 годин – на відкритому просторі.

Всі операції по нанесенню вогнезахисних речовин виконувалися з дотриманням приписів виробника і відповідно до вказівок, наведених у Технічних характеристиках і в Паспорті безпеки з нанесення вогнезахисних речовин. Жоден продукт, за винятком неорганічних речовин, не наносився при температурі нижче точки роси.

На поверхню пластини, перед нанесенням вогнезахисного речовини був нанесений шар ґрунту ГФ-021, товщиною 0,065 мм. Речовина наносилася механізованим способом агрегатом безповітряного розпилення (рис. 2.22) відповідно до регламенту робіт з вогнезахисту.



Рис. 2.22 Загальний вигляд агрегату безповітряного розпилення

Такий метод є найбільш використовуваним і економічним для нанесення великих товщин лакофарбових матеріалів з високою в'язкістю, до яких відносяться вогнезахисні покриття.

Обладнання складається з насоса, основними частинами якого є резервуар, електричний або пневматичний двигун і пістолет, оснащений спеціальними розбризкувальними соплами і системою автоматичного очищення сопла.

Ефективність вогнезахисної системи залежить від характеристик речовин, які використовуються, способів та умов їх нанесення, а також від характеристик системи, тобто від фізичних параметрів, що характеризують шар даної системи (товщини і адгезії) для необхідної межі вогнестійкості конструктивного елемента.

Для забезпечення експлуатаційних властивостей з вогнезахисної здатності утвореного вогнезахисного покриття необхідно скрупульозно дотримуватися ряду правил «вірного нанесення», звертаючи особливу увагу на стан лакофарбових матеріалів, що наносяться, методи їх нанесення, умови навколишнього середовища (в момент нанесення), стан поверхні, що

обробляється, товщини різних шарів покриття, терміни висихання кожного шару і характеристик верхнього захисного (декоративного) шару (якщо він необхідний).

Перед нанесенням фарби здійснювався вхідний контроль, який полягав у перевірці цілісності пакування, наявності маркування і відповідності терміну придатності. Перед застосуванням фарбу ретельно перемішували у заводській тарі за допомогою електричного міксера.

Серед різноманіття вогнезахисних речовин, особливе місце займають ті, що під дією високої температури спучуються, утворюючи шар пористого покриття, який володіє добрими теплоізоляційними властивостями. Однією із таких речовин є покриття «Amotherm Steel Wb» виробництва італійської фірми Amonn Fire S.r.l.

Для визначення вогнезахисної здатності цього покриття було сплановано та проведено вогневі випробування двох пластин зі сталі Ст. 3, розмірами 500×500×5 мм з нанесеним вогнезахисним складом, що спучується, «Amotherm Steel Wb» на водній основі.

Для вимірювання товщини утвореного вогнезахисного покриття використовували товщиномір, яким було здійснено вимірювання в 9 точках (рис. 2.23), середня товщина склала 0,42 мм.

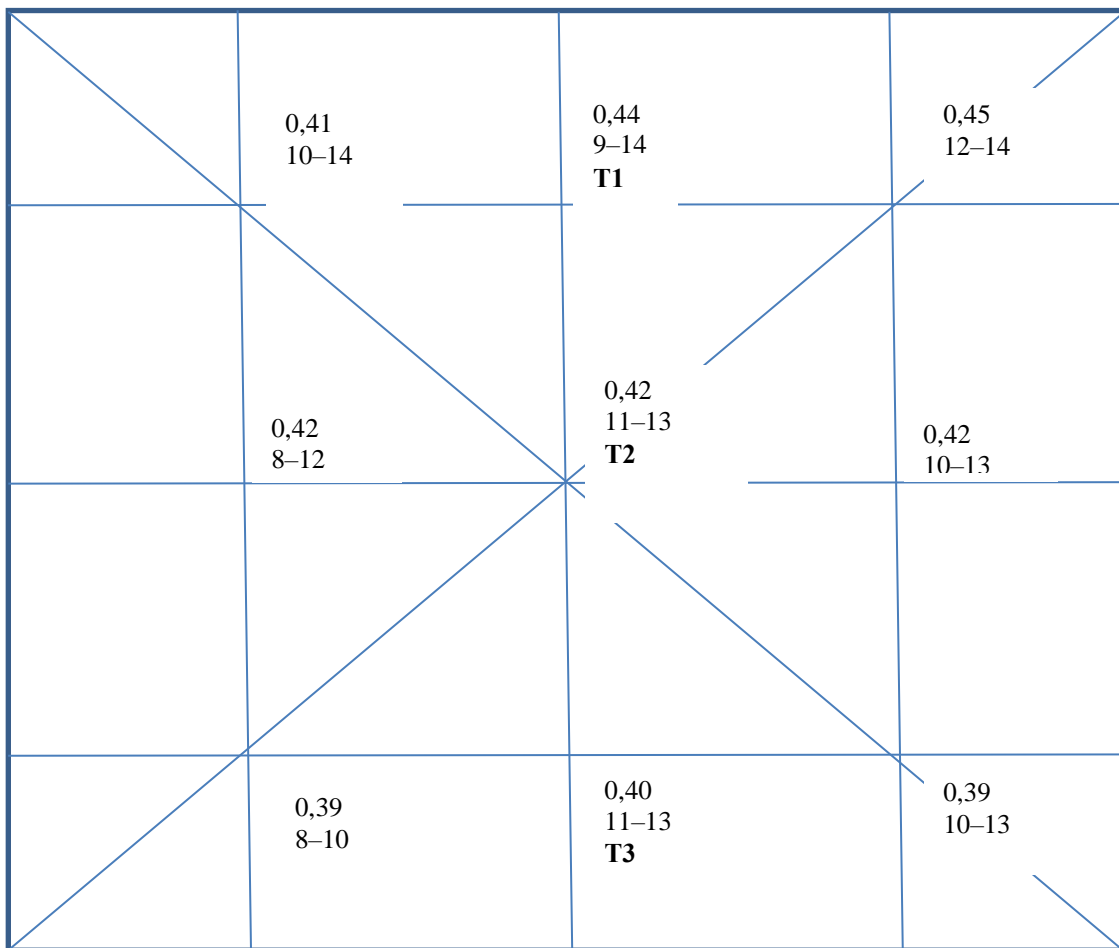


Рис. 2.23 Схема розміщення термопар та товщина покриття в місцях вимірювання: перша цифра – товщина вогнезахисного покриття з ґрунтом, мм; друга цифра – товщина спучення, мм; третя цифра – місце розміщення термопари

Для вимірювання температури з необігрівної поверхні вогнезахисної пластини було встановлено 3 термопари типу ТХА (рис. 2.24) з діаметром дроту 0,5 мм (Т1–Т3), одна термопара (Т2) у центрі зразка та дві (Т1, Т3) на відстані 100 мм від країв пластини. Спаї термопар зачеканені в метал на глибину 2 мм та прикріплені теплоізолювальним матеріалом.

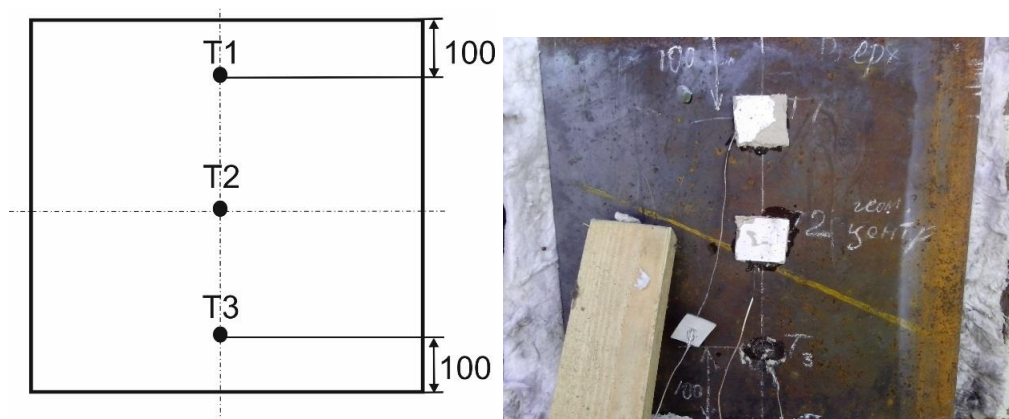


Рис. 2.24 Схема розміщення термопар з необігрівної поверхні вогнезахищеної пластини

З необігрівної поверхні пластини була захищена двома шарами мулітокремнеземового фетру, товщиною 20 мм, та плитою мінеральної вати, густиною 75 кг/м^3 і товщиною 50 мм.

Суть випробування полягала у створенні температурного режиму вуглеводневої пожежі в печі під час теплової дії на дослідний зразок і визначенні часу від початку теплової дії до досягнення температури $500 \text{ }^\circ\text{C}$ з необігрівної поверхні вогнезахищеної пластини.

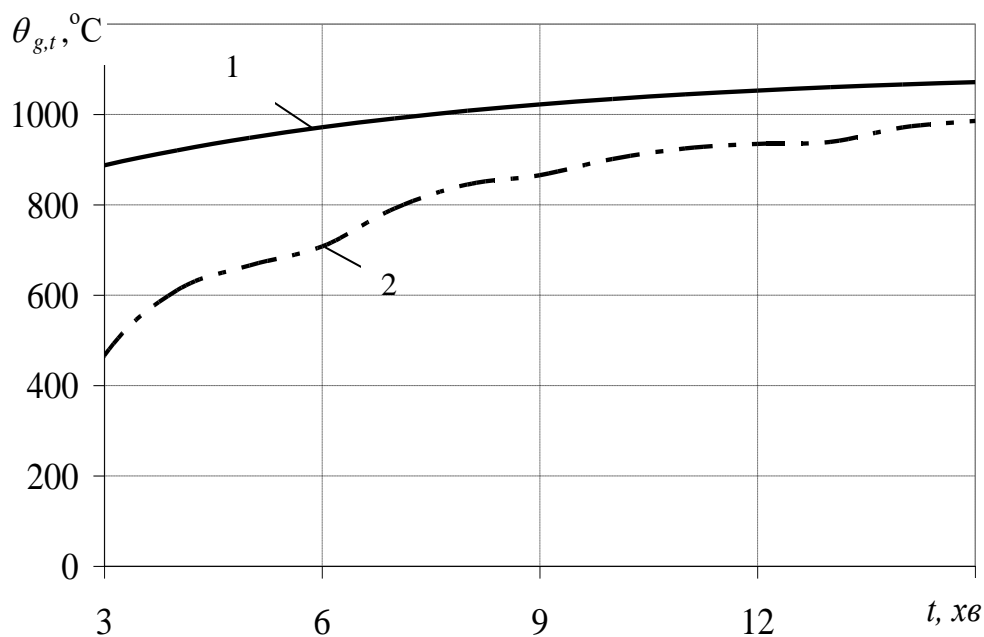


Рис. 2.25 Залежність температури в печі від тривалості вогневого впливу: 1 – крива температурного режиму вуглеводневої пожежі; 2 – температурна крива під час експерименту в печі

Випробування проводились при температурі повітря $20,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, відносній вологості повітря 48% та тискові 743 мм. рт. ст. Випробування зразків проводилися в умовах, близьких до температурного режиму вуглеводневої пожежі протягом 15 хвилин (рис. 2.25).

Як видно із рис. 2.25, температура в печі в початковий момент часу до 3 хвилин відрізняється від кривої вуглеводневої пожежі, так як дуже складно забезпечити швидке наростання температури у перші хвилини випробування. Після 3 хвилин випробування реальна температура в печі починає наближатися до температури вуглеводневої пожежі і до 15 хвилини досягає близько $985\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура з необігрівної поверхні при цьому за 15 хвилин випробувань досягла критичної температури для вогнезахищеної пластини $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 2.26).

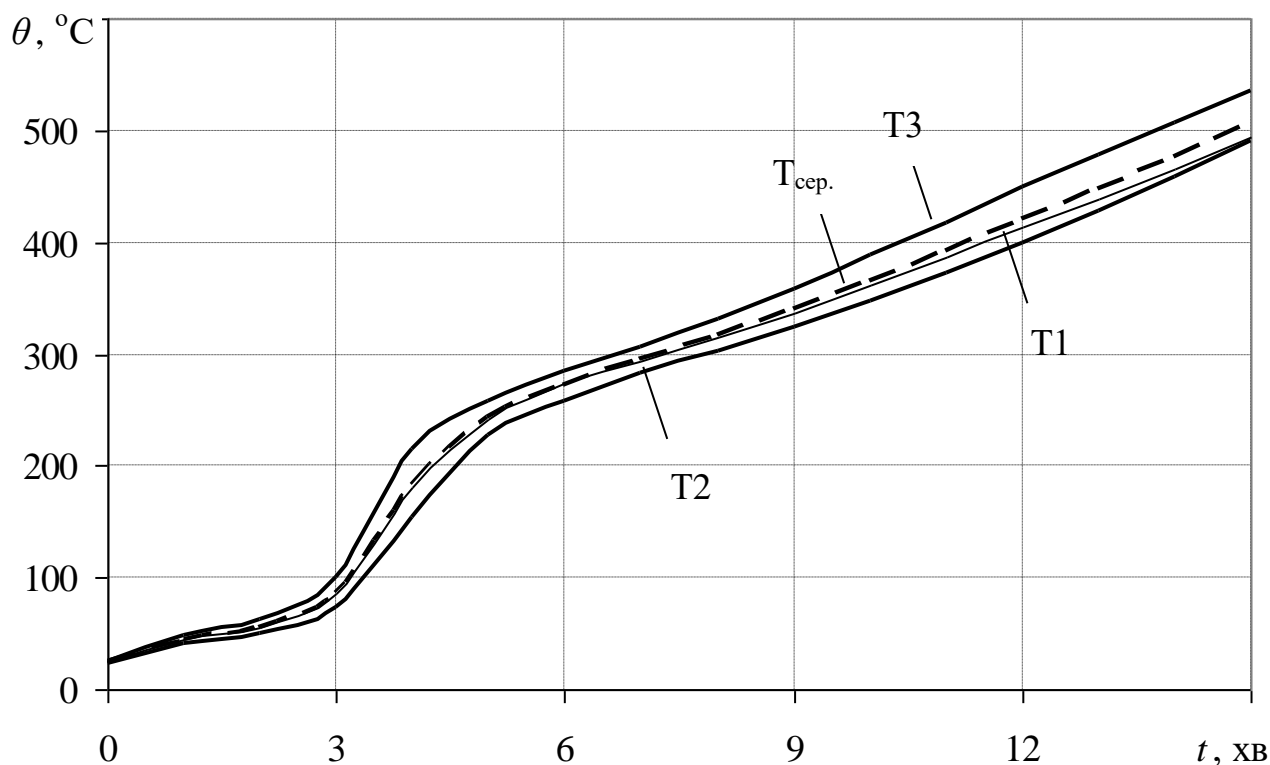


Рис. 2.26 Залежність температури з необігрівної поверхні вогнезахищеної пластини від часу вогневого впливу в різних точках вимірювання температур: T1 – термопара, встановлена на відстані 100 мм від верхнього краю пластини; T2 – термопара, встановлена по центру пластини; T3 – термопара, встановлена на відстані 100 мм від нижнього краю пластини; Tсер. – середнє значення показників трьох термопар

Як видно із рис. 2.26, характер кривих залежності температури з необігрівної поверхні вогнезахищеної пластини від часу вогневого впливу співпадає. Встановлено, що пластина рівномірно прогривається у різних частинах вимірювання температури, а відмінності у швидкості прогрівання, що спостерігаються, пояснюються неоднорідністю товщини вогнезахисного покриття. Для теплових розрахунків брали середнє значення показників трьох термопар, встановлених з необігрівної поверхні вогнезахищеної пластини (рис. 2.25).

Після випробувань при візуальному огляді зразків встановлено (рис. 2.27):

– досліджувана вогнезахисна речовина, нанесена на вогнезахищену пластину, розмірами 500×500×5 мм з ґрунт ГФ-021 (товщина 0,065 мм), має задовільну адгезійну міцність;

– відшарування утвореного покриття від вогнезахищеної пластини за площею не спостерігалось;

– середня товщина спученого шару після проведення випробувань склала 10 мм (8–14 мм).



Рис. 2.27 Загальний вигляд вогнезахищеної пластини з покриттям «Amotherm Steel Wb» після випробувань

Порівнюючи час прогріву вогнезахищеної пластини з досліджуваним вогнезахисним покриттям при вогневому впливі температурного режиму

вуглеводневої та стандартної пожежі, впливає, що при товщині покриття 0,42 мм, час, за який вогнезахищена пластина товщиною 5 мм прогрівається до критичної температури 500 °С при стандартному температурному режимі в 1,9 разів більший, ніж при температурному режимі вуглеводневої пожежі (рис. 2.28).

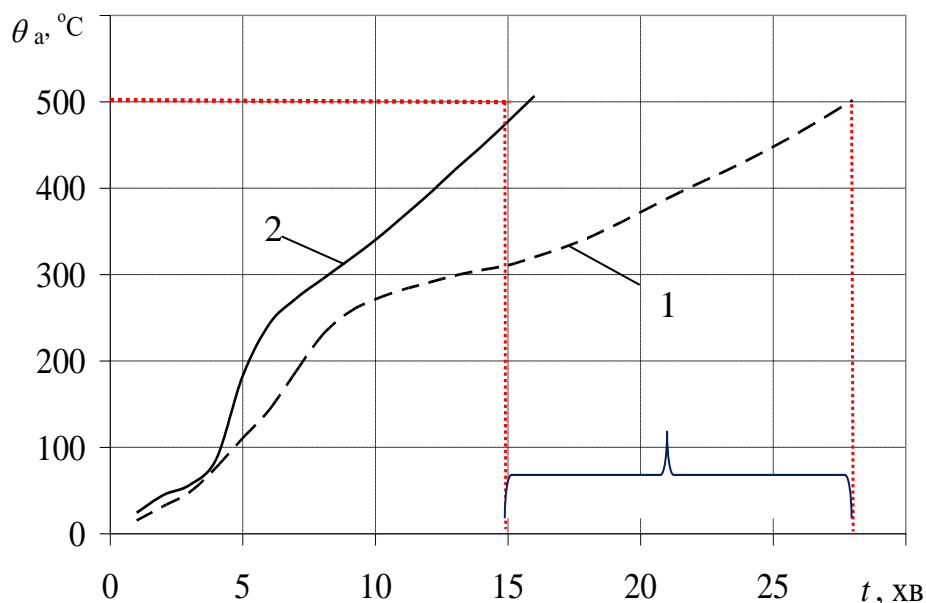


Рис. 2.28 Залежність температури з необігрівної поверхні вогнезахищеної пластини від часу вогневого впливу при різних температурних режимах пожежі: 1 – стандартна пожежа; 2 – вуглеводнева пожежа

Із рис. 2.28 випливає, що вогнезахищена пластина, а відповідно і вогнезахищена конструкція, при більш жорстких умовах пожежі прогріється швидше, а отже і товщина вогнезахисного покриття для забезпечення нормованої межі вогнестійкості повинна бути більшою. Це вказує на розбіжності у значеннях межі вогнестійкості вогнезахищених конструкцій при їх застосуванні на об'єктах різного функціонального призначення.

На основі отриманих даних (температура необігрівної поверхні вогнезахищеної пластини), розв'язанням оберненої задачі теплопровідності, розраховані теплофізичні характеристики вогнезахисного покриття: залежність

коефіцієнта теплопровідності від температури (рис. 2.29) та постійне значення питомої об'ємної теплоємності. Обернена задача теплопровідності розв'язана екстремальним методом, що заснований на використанні ітераційного методу Ньютона-Гауса пошуку мінімуму функції F і методу регуляризації Тихонова А. М.

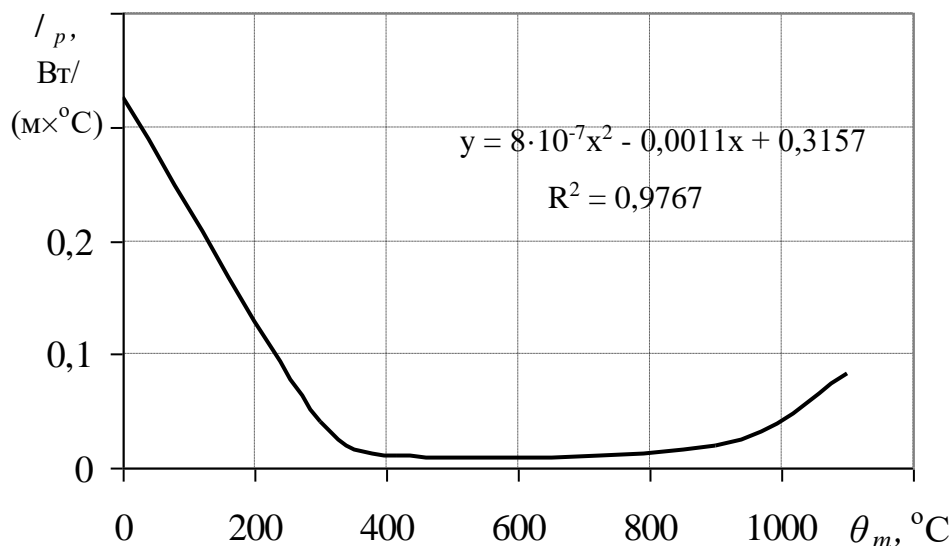


Рис. 2.29 Залежність ефективного коефіцієнта теплопровідності досліджуваного вогнезахисного покриття від температури, знайденого розв'язанням обернених задач теплопровідності

Як видно із рис. 2.29, в діапазоні температур від початкової температури до 400°C значення коефіцієнта теплопровідності досліджуваного покриття спадає, що можна пояснити спученням покриття та збільшенням його пористості, і проходить через мінімальне значення приблизно $0,01 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ (при температурі від 400°C до 1000°C). Зростання коефіцієнту теплопровідності в діапазоні температур після 1000°C пояснюється появою радіаційної складової в порах покриття в поєднанні з його високотемпературною усадкою і обвуглюванням. Постійне значення питомої об'ємної теплоємності склало $C_v=6\cdot 10^4 \text{ Дж}/(\text{м}^3\cdot^{\circ}\text{C})$. При цьому спостерігалася

найбільша збіжність експериментальних і розрахункових температур, а критерій середньоквадратичного відхилення склав $12,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

У роботі прийнято, що отриманий ефективний коефіцієнт теплопровідності (рис. 2.29) та питомої об'ємної теплоємності покриття відноситься до початкової товщини покриття, тому розрахункові моделі процесу теплопровідності теж бралися з товщиною покриття, незмінною в часі.

На основі отриманих теплофізичних характеристик покриття, використовуючи розроблені раніше моделі шляхом розв'язання серії прямих задач теплопровідності визначена залежність мінімальної товщини покриття від товщини вогнезахищеної пластини для критичної температури $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ і нормованої тривалості вогневого впливу 30 хвилин (рис. 2.309). Прямі задачі теплопровідності розв'язували чисельним методом скінчених різниць. Кількість вузлів становила 25 по просторовій координаті, крок за часом 30 с.

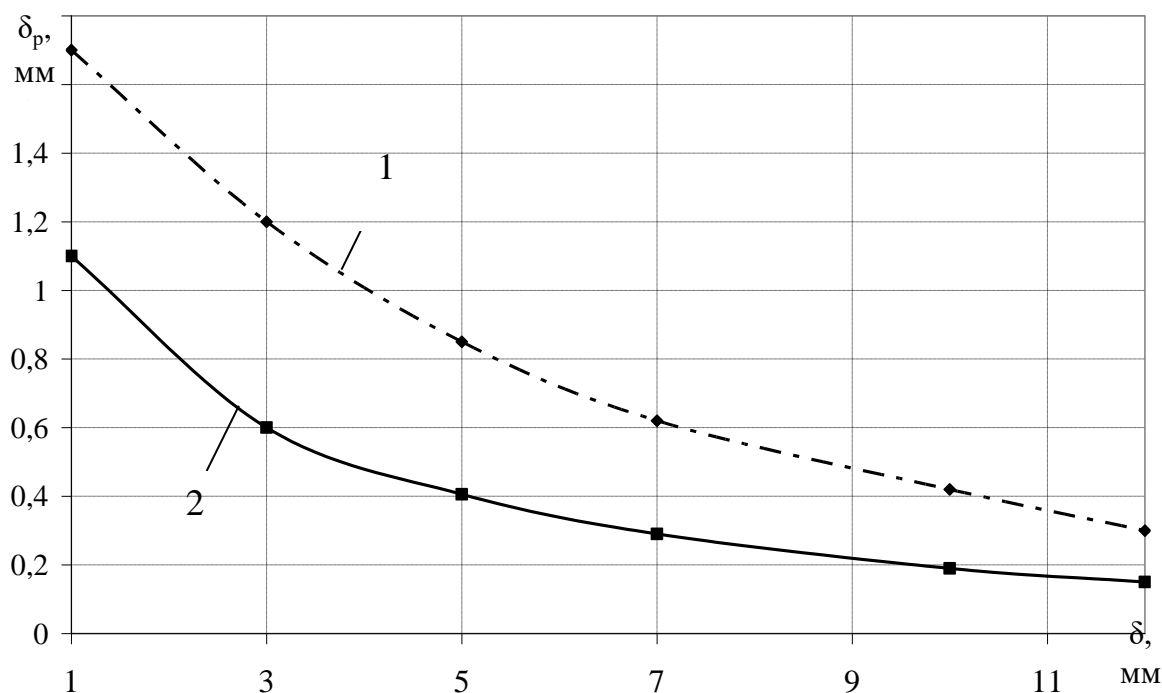


Рис. 2.30 Залежність мінімальної товщини досліджуваного вогнезахисного покриття (δ_p) від товщини вогнезахищеної пластини (δ) для критичної температури сталі 500°C і нормованої тривалості вогневого впливу 30 хвилин: 1 – при температурному режимі вуглеводневої пожежі; 2 – при стандартному температурному режимі пожежі

Порівнюючи залежності, наведені на рис. 2.30, можна зробити висновок про те, що значення мінімальної товщини вогнезахисного покриття для вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі у 2 рази більші, ніж для стандартного температурного режиму. Це вказує на необхідність оцінювання вогнезахисної ефективності покриттів вогнезахисних конструкцій з урахуванням конкретних режимів пожеж, що відповідають умовам експлуатації відповідних будівель та споруд та типів вогнезахисних покриттів (реактивних і пасивних).

Висновки до розділу 2

1. Розроблено математичну модель для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. При цьому застосовано алгоритм, що включає виконання таких етапів: вибір апарату формалізації, побудова зовнішнього опису, перевірка працездатності моделі, побудова внутрішнього стану, перевірка працездатності та ідентифікація параметрів. Сформульовані початкові та граничні умови при побудові зазначених моделей, які дозволяють з достатньою для інженерних розрахунків точністю прогнозувати вогнестійкість вогнезахисної залізобетонної конструкції. Особливістю розроблених моделей є врахування теплофізичних характеристик залізобетонних конструкцій та вогнезахисних покриттів, особливостей режимів пожежі, міцнісних та деформаційних властивостей матеріалів при високих температурах, нелінійні закони деформування матеріалів конструкції. Вперше виявлені закономірності впливу вологості, температури та концентрації твердих домішок в повітрі на значення коефіцієнту теплообміну між необігрівною поверхнею та повітрям навколишнього середовища за допомогою методу планування багатофакторного експерименту у вигляді регресійної залежності виду:

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

2. На основі розробленої математичної моделі розроблено розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. Структурно-логічна схема реалізації розробленого методу передбачає 9 блоків, пов'язаних логічними зв'язками та включає експериментальну і розрахункову частини. При цьому експериментальна частина методу передбачає проведення серії випробувань на вогнестійкість при заданих режимах пожежі (стандартний, зовнішньої, вуглеводневої, тунельної, реальної пожежі). Розрахункова частина містить наступні обов'язкові процедури: побудову розрахункової моделі фізичного процесу; ідентифікацію за даними випробувань на вогнестійкість теплофізичних характеристик моделі на основі розв'язання обернених задач теплопровідності; визначення характеристик вогнезахисної здатності покриттів за результатами випробувань на вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій при різних умовах випробувань (температурні режими пожежі, умови закріплення, навантаження зразків, схему вимірювання температур, кліматичні фактори).

3. Перевірено працездатність розробленого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій шляхом виявлення взаємозв'язку між параметрами пасивного вогнезахисного покриття (на прикладі складу «Неоспрей») та вогнестійкістю вогнезахисного багатопустотного залізобетонного перекриття. Встановлено залежність товщини пасивного вогнезахисного покриття «Неоспрей» від товщини захисного шару бетону вогнезахисного залізобетонного багатопустотного перекриття для нормованої межі вогнестійкості перекриття 60–240 хвилин. Доведено ефективність досліджуваного вогнезахисного покриття та встановлено залежність коефіцієнту теплопровідності від температури в умовах нагріву в випробувальній печі вогнезахисного багатопустотного залізобетонного перекриття при стандартному температурному режимі пожежі. Виявлено, що в

діапазоні температур від 0 °С до 500 °С значення коефіцієнта теплопровідності пасивного вогнезахисного покриття «Неоспрей» знижується і проходить через мінімальне значення 0,5 Вт/(м·°С) (при температурі 500 °С). Це пояснюється зниженням густини і збільшенням пористості покриття за рахунок видалення хімічно зв'язаної вологи. Зростання коефіцієнту теплопровідності в діапазоні температур від 500 °С до 1100 °С, пояснюється появою радіаційної складової в порах покриття в поєднанні з його високотемпературною усадкою.

4. Перевірено працездатність розробленого розрахунково-експериментального методу при оцінюванні вогнестійкості на масштабованих зразках, покритих з однієї сторони іншими реактивними вогнезахисними покриттями в умовах нагріву при температурному режимі вуглеводневої пожежі. Встановлено, що в діапазоні температур від початкової температури до 400 °С значення коефіцієнту теплопровідності вогнезахисного покриття спадає, що пояснюється збільшенням його пористості. Надалі значення коефіцієнту теплопровідності набуває мінімального значення близько 0,01 Вт/(м·°С) (при температурі від 400 °С до 1000 °С). Зростання коефіцієнту теплопровідності в діапазоні температур після 1000 °С пояснюється появою радіаційної складової в порах покриття в поєднанні з його високотемпературною усадкою і обвуглюванням.

5. Виявлено вплив температурних режимів пожежі та кліматичних факторів на вогнестійкість вогнезахисних конструкцій. За результатами експериментальних досліджень встановлено:

- впродовж 3-ох років впливу кліматичних факторів (за методикою пришвидшеного старіння) в кліматичній камері за умовами випробувань для приміщення, що не опалюється, значення теплофізичних характеристик реактивного вогнезахисного покриття вогнезахисних конструкцій, не відрізняються від початкового значення;

- мінімальна товщина покриття для забезпечення нормованого значення межі вогнестійкості у разі випробувань при стандартному температурному

режиму пожежі в 1,5 разів менша від значення товщини в умовах режиму вуглеводневої пожежі.

РОЗДІЛ 3

ПЕРЕВІРКА ДОСТОВІРНОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МЕТОДУ

Перевірено достовірність розроблених математичної моделі та розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій використовуючи аналіз чутливості параметрів математичної моделі на вихідний результат та обчислювальний експеримент. Проведено аналіз похибок у вимірюванні температури на точність визначення параметрів вогнезахисного покриття. Досліджено вплив температурних режимів пожежі на точність методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій.

3.1 Результати аналізу чутливості параметрів математичної моделі на вихідний результат

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

Серед параметрів моделі необхідно ідентифікувати ті, які є невідомими або недостатньо відомими і найбільш впливають на розрахункові значення температур обраної математичної моделі. Під ідентифікованістю параметрів мається на увазі процедура, яка показує, по-перше, принципову можливість знаходження параметрів за допомогою розв'язання обернених задач і, по-друге, якщо вони знаходяться, то з якою похибкою. Обернені задачі забезпечують знаходження таких значень параметрів моделі, які дають близькість експериментальних і розрахункових значень температур в точках вимірювання досліджуваних вогнезахисних залізобетонних конструкцій. Процес

визначення ступеня впливу параметрів моделі на вихідний результат (в нашому випадку температури) називається аналізом чутливості.

В якості коефіцієнта чутливості (3.1) вибрано відношення величини середньоквадратичного відхилення температур до відносного значення зміни аналізованого параметра моделі P_i .

$$F_i = \frac{\Phi}{\Delta P_i / P_i}, \quad (3.1)$$

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

Аналіз параметрів моделі, що ідентифікуються, зазвичай проводиться шляхом розв'язання тестових задач, в яких значення температур в передбачуваних точках вимірювання визначаються з обчислювального експерименту (розрахунку температур при заданих параметрах моделі, розв'язання прямих задач). Методика аналізу чутливості полягає в послідовному збуренні параметрів моделі, ідентифікації теплофізичних характеристик і розв'язанні серії прямих задач теплопровідності для отримання значень середньоквадратичного відхилення температури в часі і безпосередньому розрахунку коефіцієнтів чутливості F (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Чутливість температур в точках вимірювання до параметрів моделі теплопровідності вогнезахисної штукатурним покриттям залізобетонної конструкції (на прикладі багатопустотного залізобетонного перекриття)

№	Назва параметру	Величина F_i
1	Коефіцієнт теплопровідності λ штукатурного покриття	4,72
2	Питома об'ємна теплоємність бетону C_V шарів 1, 3, 5 перекриття	2,7
3	Питома об'ємна теплоємність бетону C_V шару 2	1,94

Продовження таблиці 3.1

4	Коефіцієнт теплопровідності бетону λ шарів 1, 3, 5 перекриття	0,26
5	Коефіцієнт тепловіддачі α_{c2} від бетонної не обігрівної поверхні залізобетонної конструкції	0,22
6	Коефіцієнт теплопровідності λ шару 2	0,2
7	Питома об'ємна теплоємність штукатурного покриття C_V	0,18
8	Ступінь чорноти бетону	0,16
9	Коефіцієнт тепловіддачі α_{c1} від гарячих газів до обігрівної поверхні	0,14

У табл. 3.1 та на рис. 3.1 в порядку зменшення представлено кількісний вплив різних параметрів математичної моделі на температури у вогнезахисній залізобетонній конструкції в точках вимірювання. Встановлено, що найбільше впливають такі параметрами моделі: коефіцієнт теплопровідності λ штукатурного покриття і питома об'ємна теплоємність бетону C_V шарів 1, 3, 5.

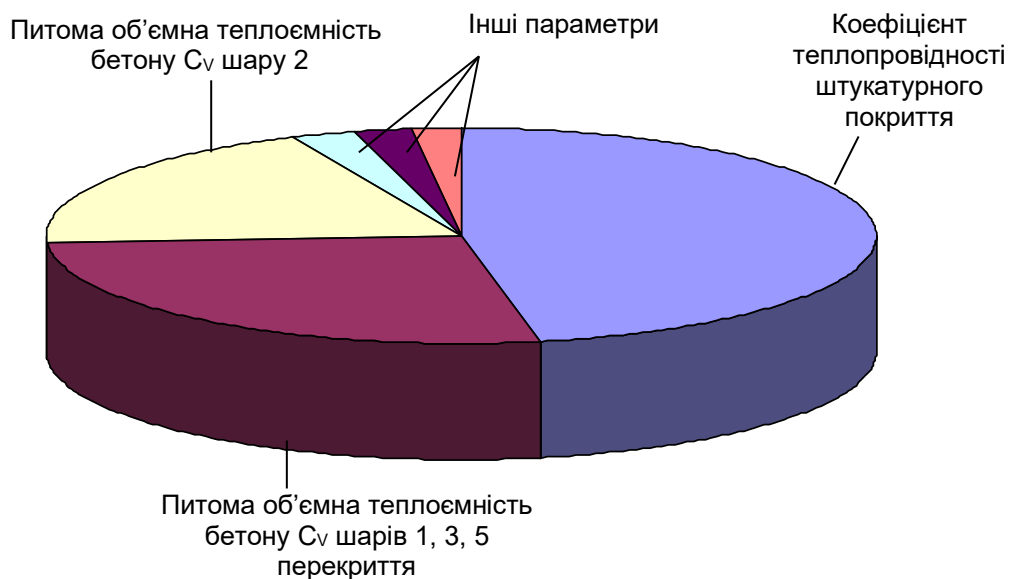


Рис. 3.1 Найбільш значущі (вагомі) параметри моделі теплопровідності вогнезахисної залізобетонної конструкції

Ці результати дозволили визначити перелік параметрів математичної моделі, які необхідно розраховувати за допомогою обернених задач

теплопровідності за даними випробувань на вогнестійкість з достатньою точністю [229].

3.2 Результати аналізу похибок у вимірюванні температури на точність визначення параметрів вогнезахисного покриття

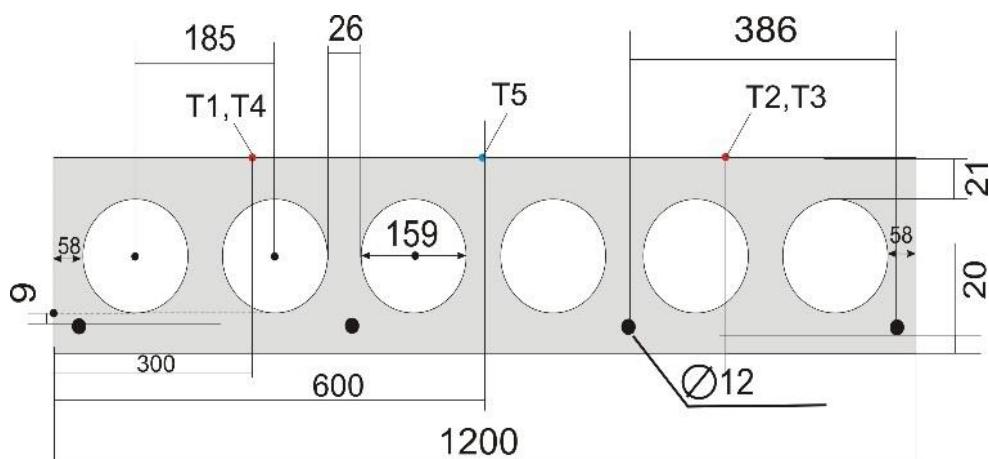
Важливим аспектом для дослідження вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій крім визначення теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів є також правильність і точність визначення цих характеристик з урахуванням можливих похибок під час вимірювання температур з необігрівної поверхні вогнезахисненої залізобетонної конструкції. Не врахування або нехтування можливими похибками у вимірюванні температур може призвести до недостовірного визначення теплофізичних характеристик покриттів, а в подальшому – і до неправильного визначення вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій, що негативним чином вплине на основні показники пожежної статистики [230]. Обернені задачі теплопровідності, вирішуються як на «точних» значеннях температур (без урахування похибок експериментальних вимірювань), так і на «збурених» значеннях температур, щоб показати вплив випадкових складових помилок вимірювань, на точність визначення параметрів моделі. Вплив систематичних складових помилок вимірювань – питання складне в практиці реальних вимірювань, їх облік також можливий в обчислювальному експерименті та аналізі ідентифікованих, але нами не розглядається.

Під час проведення випробувань на вогнестійкість виникають похибки вимірювань, які враховують в обчислювальному експерименті шляхом введення в значення температур, отриманих за показниками 5-ти термопар (рис. 3.2, б), помилок випадкового характеру, що відповідають рівню реальних помилок вимірювань. Для вимірювання температур використовували термопари ТХА з максимальною невизначеністю вимірювання за температури від 0 °С до 334 °С – 2,5°С, а за температури від 334 °С до 1300 °С –

$2,5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,0075 \cdot T_{\text{вим.}}$ (максимальна $12,25\text{ }^{\circ}\text{C}$). Інструментальна похибка вимірювально-реєструвального комплексу становила $\pm(0,5+0,0009T)$ за температури $0\text{--}1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (максимальна $1,67\text{ }^{\circ}\text{C}$). В сумі це дорівнює відхиленню температур в $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, що дорівнює похибці 10% .



a



б

Рис. 3.2 Загальний вигляд вогнезахищеного багатопустотного залізобетонного перекриття до випробування (*a*) та схема розташування термопар (*б*)

В роботі проведено обчислювальний експеримент, що імітує випробування на вогнестійкість, в результаті якого були отримані розрахункові значення

температур з необігрівної поверхні вогнезахищеного багатопустотного залізобетонного перекриття (рис. 3.3). Проведено дослідження впливу похибок у вимірюванні температури з необігрівної поверхні залізобетонного багатопустотного перекриття на точність визначення теплофізичних характеристик штукатурного покриття [230]. Вводилися випадкові похибки 10 % у вимірюванні температур з необігрівної поверхні перекриття за допомогою генератора випадкових чисел.

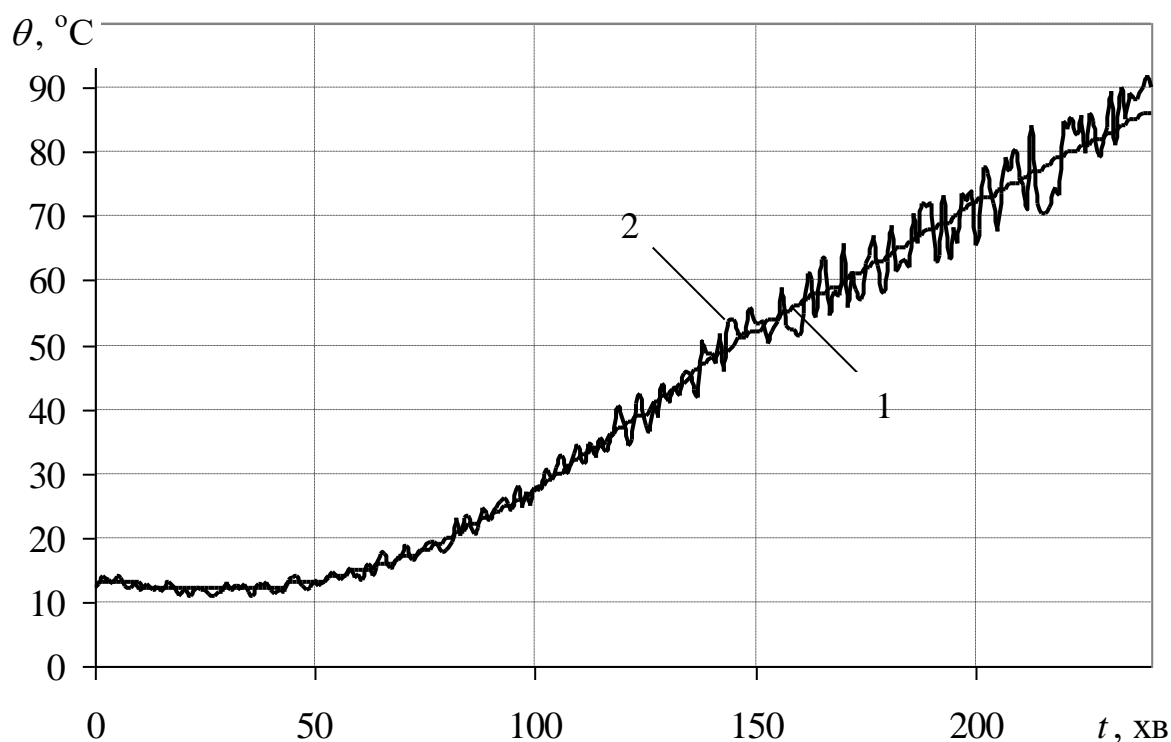


Рис. 3.3 Точні і збурені до 10 % значення температур з необігрівної поверхні вогнезахищеного залізобетонного перекриття: 1 – точна крива; 2 – крива, збурена на 10 %

Далі за збуреними на 10 % температурам з необігрівної поверхні вогнезахищеного перекриття, розв'язанням обернених задач теплопровідності, знаходили теплофізичні характеристики досліджуваного штукатурного покриття (рис. 3.4).

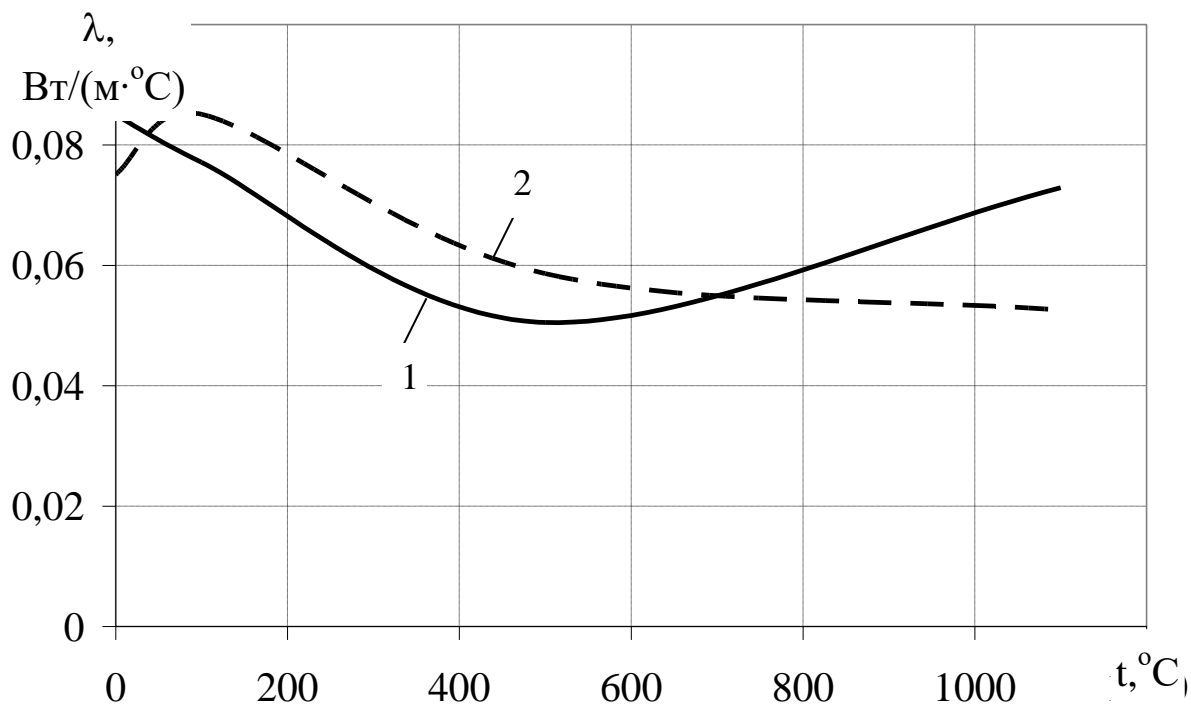


Рис. 3.4 Залежність ефективного коефіцієнта теплопровідності досліджуваного штукатурного покриття від температури: 1 – точні коефіцієнти; 2 – коефіцієнти, отримані розв'язанням обернених задач теплопровідності при збурених температурах на 10 %

Як видно із рис. 3.4, випадкові похибки у вимірюванні температур з необігрівної поверхні вогнезахищеного залізобетонного перекриття, впливають на точність визначення теплофізичних характеристик покриття, що досліджувалось (максимальна похибка до 30 %) [231].

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

Нарівні з основними параметрами (коефіцієнт теплопровідності λ штукатурного покриття і питома об'ємна теплоємність бетону C_v шарів 1, 3, 5), що впливають на точність визначення теплофізичних характеристик і характеристики вогнезахисної здатності покриття (табл. 3.1), є коефіцієнт тепловіддачі α_{c2} від бетонної необігрівної поверхні залізобетонного перекриття.

Тому, було проведено дослідження з визначення ступеня впливу коефіцієнта тепловіддачі на точність визначення коефіцієнта теплопровідності штукатурного вогнезахисного покриття, а в подальшому і характеристики вогнезахисної здатності покриття [232].

Система рівнянь математичної моделі вирішувалася чисельно методом скінчених різниць за допомогою розв'язання ОЗТ за даними випробувань на вогнестійкість, з коефіцієнтом тепловіддачі α_{c2} , який задавали в межах 3–7 Вт/(м²·°С), а також таким, що залежить від температури. В результаті дослідження отримані залежності ефективного коефіцієнта теплопровідності штукатурного покриття від температури, знайденого розв'язанням обернених задач теплопровідності за даними випробувань на вогнестійкість (рис. 3.5).

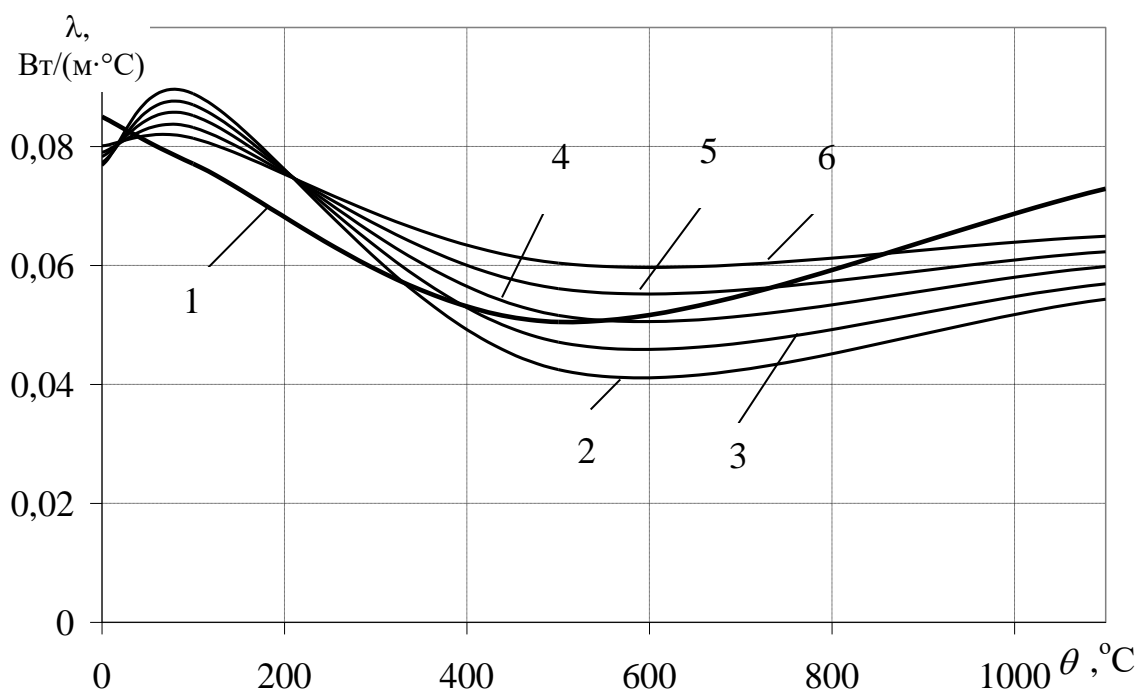


Рис. 3.5 Залежність ефективного коефіцієнта теплопровідності штукатурного покриття від температури, знайденого розв'язанням обернених задач теплопровідності за даними випробувань на вогнестійкість: 1 – за α_{c2} , що залежить від температури; 2 – $\alpha_{c2}=3$ Вт/(м²·°С); 3 – $\alpha_{c2}=4$ Вт/(м²·°С); 4 – $\alpha_{c2}=5$ Вт/(м²·°С); 5 – $\alpha_{c2}=6$ Вт/(м²·°С); 6 – $\alpha_{c2}=7$ Вт/(м²·°С)

Як видно з рис. 3.5, зі збільшенням коефіцієнту тепловіддачі з необігрівної поверхні залізобетонного перекриття з покриттям, похибка визначення коефіцієнту теплопровідності збільшується і становить 25 % (для $\alpha_{c2}=7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$). Встановлено, що цьому коефіцієнту необхідно приділяти особливу увагу, і найбільш правильний шлях – це задавати його таким, що залежить від температури (рис. 3.5, крива 1). Значення зазначеного параметра є визначальними при впливові на вогнестійкість досліджуваних вогнезахисних багатопустотних залізобетонних перекриттів, а отже і на рекомендації щодо точності визначення як теплофізичних характеристик, так і в подальшому характеристики вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів, що і становить часто кінцеву мету розрахунків теплових процесів, що відбуваються в вогнезахисних залізобетонних конструкціях [232].

Таким чином, в даному підрозділі досліджено вплив помилок у вимірюванні температур з необігрівної поверхні вогнезахисної залізобетонної конструкції (на прикладі багатопустотного залізобетонного перекриття) на похибку визначення теплофізичних характеристик досліджуваного штукатурного покриття і встановлено, що випадкові похибки в 10 % при вимірюванні температур з необігрівної поверхні вогнезахисного перекриття, суттєво впливають на точність визначення теплофізичних характеристик покриття (максимальна похибка до 30 %).

Встановлено, що при оцінюванні вогнестійкості вогнезахисних багатопустотних залізобетонних перекриттів, коефіцієнт тепловіддачі між необігрівною поверхнею перекриття і навколишнім середовищем впливає на точність визначення теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття, тому його необхідно задавати таким, що залежить від температури.

3.3 Визначення впливу температурних режимів пожежі на точність методу

Розкриті особливості впливу температурних режимів пожежі на характеристику вогнезахисної здатності покриттів вогнезахищених залізобетонних конструкцій.

Приділено увагу дослідженню працездатності запропонованого розрахунково-експериментального методу в умовах температурних режимів пожежі, відмінних від стандартного та довільних значень товщини вогнезахисного покриття при заданій товщині захисного шару бетону перекриття. Для цього вирішувалась низка тестових задач теплопровідності за даними обчислювального експерименту, тобто розв'язання ряду прямих задач теплопровідності з заданими теплофізичними характеристиками бетону і вогнезахисного покриття на прикладі багатопустотного залізобетонного перекриття – конструкції, яка має найбільш складну будову (наявність пустот) і, відповідно, найбільш складну процедуру розрахунку нестационарного прогріву вогнезахищеної конструкції.

Схема рішення обрана максимально наближеною до випробувань на вогнестійкість багатопустотних залізобетонних перекриттів. Для проведення обчислювального експерименту були обрані багатопустотні залізобетонні перекриття ПК 48-12-8т розмірами 4780×1190 мм, товщиною 220 мм і вогнезахисне покриття «Ендотерм 210104» середньої товщиною 37 мм. Коефіцієнт тепловіддачі на поверхні, що обігривається, приймався рівним 25 Вт/(м²·°C), коефіцієнт тепловіддачі між необігрівною поверхнею перекриття і навколишнім повітрям α_{c2} приймався таким, що залежить від температури за законом вільного конвективного теплообміну від горизонтальної поверхні, ступінь чорноти бетону приймався рівним 0,7. Теплофізичні характеристики бетону шарів 1,3 і 5 задавали з [233, 234], а теплофізичні характеристики шару 2 (шар пустот з перемичками бетону) шукали розв'язанням обернених задач

теплопровідності. При цьому задавали теплофізичні характеристики покриття [207]: коефіцієнт теплопровідності, що залежить від температури (рис. 3.6), питома об'ємна теплоємність постійна і рівна $1,01 \cdot 10^6$ Дж/(м³·°C).

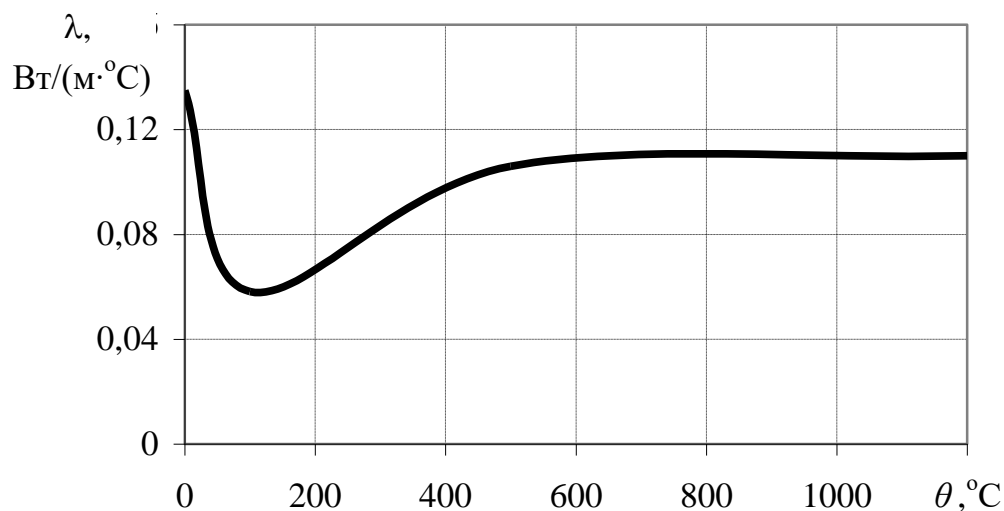


Рис. 3.6 Залежність ефективного коефіцієнта теплопровідності штукатурного покриття від температури, знайденого розв'язанням обернених задач теплопровідності за даними випробувань на вогнестійкість

У тестових завданнях з допомогою математичної і комп'ютерної моделей, заданих теплофізичних характеристик і граничних умов розв'язанням прямих задач теплопровідності, отримували нестационарне температурне розподілення у вогнезахищеному багатопустотному залізобетонному перекритті спочатку за стандартним температурним режимом, а потім при режимі тунельної кривої по стандартам Нідерландів (RWS) і вуглеводневої кривої (рис. 3.7). При розв'язанні серії прямих задач теплопровідності, використовували граничний стан конструкції з вогнестійкості по досягненню критичної температури 500 °C арматурою з боку вогневого впливу при заданому в випробуванні рівні навантаження.

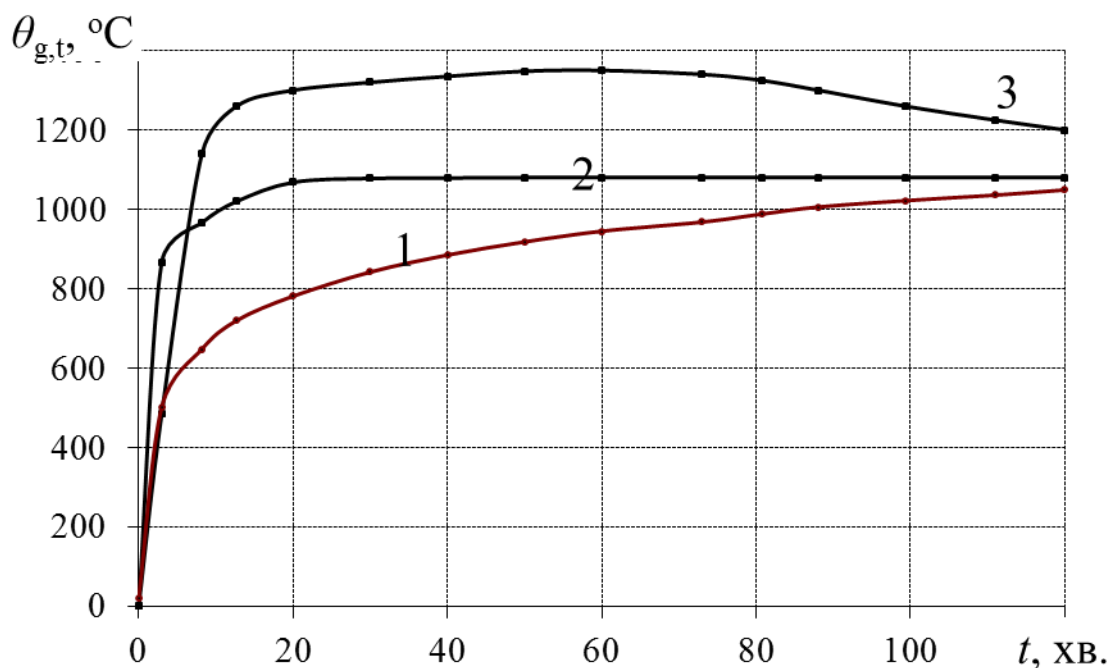


Рис. 3.7 Залежність зміни температури від тривалості вогневого впливу при різних режимах пожежі, де: 1 – стандартна температурна крива по ISO 834; 2 – вуглеводнева крива по EN 1363-2:1999; 3 – тунельна крива за стандартами Нідерландів (RWS)

Розв'язанням серії прямих задач теплопровідності, на основі розробленої математичної моделі теплового стану залізобетонного перекриття, були отримані товщини вогнезахисного штукатурного покриття для нормованої межі вогнестійкості перекриття 180 хвилин (табл. 3.2).

Таблиця 3.2

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

Товщина захисного шару бетону багатопустотного залізобетонного перекриття, мм	Мінімальна товщина вогнезахисного покриття, мм		
	Стандартний температурний режим	Режим вуглеводневої пожежі	Режим тунельної пожежі за стандартами Нідерландів (RWS)
10	15,5	17,3	20

Продовження табл. 3.2			
30	10,98	12,7	15,1
40	8,85	10,55	12,7
60	4,73	6,3	8,1

При цьому приймалося допущення, що для розв'язання прямих задач теплопровідності з визначення характеристики вогнезахисної здатності покриття при режимі вуглеводневої пожежі і режимі тунельної пожежі за стандартами Нідерландів (RWS) теплофізичні характеристики вогнезахисного покриття задавали знайдені розв'язання обернених задач теплопровідності, використовуючи дані випробувань на вогнестійкість багатопустотних залізобетонних перекриттів за стандартним температурним режимом пожежі.

Залежність товщини досліджуваного вогнезахисного покриття при товщині захисного шару бетону 10–60 мм для забезпечення нормованої межі вогнестійкості перекриття в 180 хвилин показані на рис. 3.8 [235].

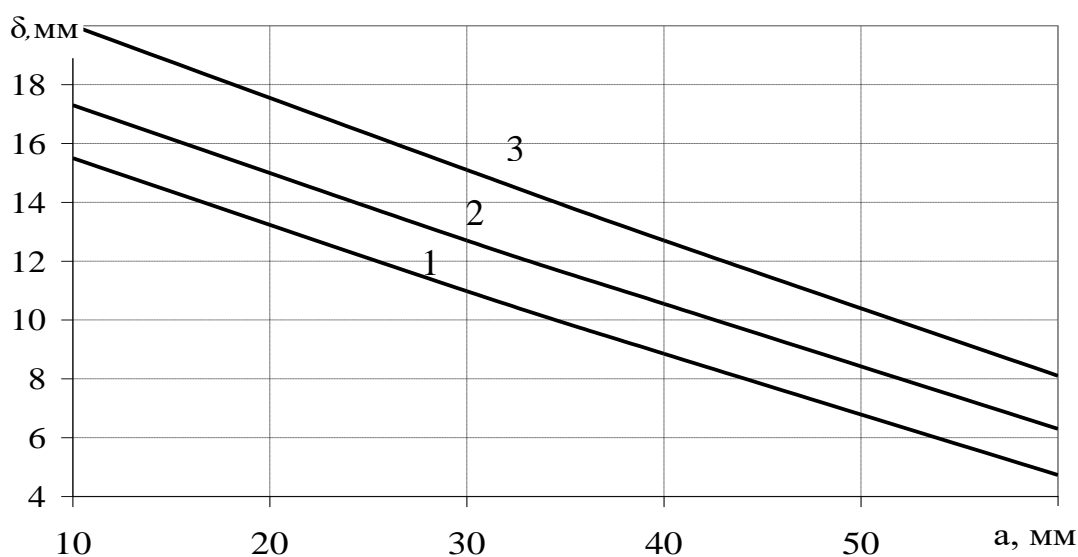


Рис. 3.8 Характеристика вогнезахисної здатності досліджуваного штукатурного покриття за критерієм досягнення критичної температури арматури (500 °С) для межі вогнестійкості 180 хвилин: 1 – для стандартного температурного режиму; 2 – для режиму вуглеводневої пожежі; 3 – для режиму тунельної пожежі за стандартами Нідерландів (RWS)

Як видно з рис. 3.8, значення мінімальної товщини досліджуваного вогнезахисного покриття, яке забезпечує нормовану межу вогнестійкості вогнезахищеного багатопустотного залізобетонного перекриття, і розраховане для стандартного температурного режиму пожежі [236], значно менше від значення для інших температурних режимів [237,238]. В результаті встановлено, що різниця між значеннями мінімально необхідної товщини досліджуваного вогнезахисного покриття для стандартного температурного режиму та температурного режиму вуглеводневої пожежі становить близько 12 %, а різниця між значеннями необхідної товщини досліджуваного вогнезахисного покриття для стандартного температурного режиму та температурного режиму за стандартами Нідерландів (RWS) – 29 %.

Визначено вплив температурних режимів пожежі на характеристику вогнезахисної здатності досліджуваного вогнезахисного покриття для забезпечення нормованої межі вогнестійкості вогнезахищеного багатопустотного залізобетонного перекриття. При цьому встановлено, що необхідні значення мінімальної товщини покриття варіюються від 8,1 до 20 мм для температурного режиму пожежі за стандартами Нідерландів (RWS), а для стандартного температурного режиму – від 4,73 до 15,5 мм.

Таким чином, розроблений розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій, дозволяє з достатньою для інженерних розрахунків точністю (до 10 %) оцінювати вогнестійкість вогнезахищених залізобетонних конструкцій [239]. Запропонований метод дозволяє враховувати конструктивні особливості залізобетонних конструкцій [239, 240], температурні режими пожеж, за яких випробовують конструкції, теплофізичні характеристики бетону [242], арматурних стрижнів залізобетонних конструкцій [243], теплофізичні характеристики вогнезахисних покриттів, мінімальну товщину вогнезахисного покриття для забезпечення нормованих значень межі вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій [244].

Висновки до розділу 3

1. Перевірено достовірність розроблених математичної моделі та розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій методом обчислювального експерименту. Встановлено, що випадкові похибки 10 % при вимірюванні температур з необігрівної поверхні вогнезахисного перекриття суттєво впливають на точність визначення теплофізичних характеристик покриття (максимальна похибка до 30 %).

2. Встановлено, що найбільший вплив на точність оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій мають коефіцієнт теплопровідності вогнезахисного покриття, питома об'ємна теплоємність бетону залізобетонного перекриття та коефіцієнт тепловіддачі між необігрівною поверхнею перекриття і навколишнім середовищем.

3. Досліджено вплив температурного режиму пожежі на характеристику вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів для забезпечення вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. При цьому встановлено, що різниця між значеннями мінімально необхідної товщини вогнезахисного покриття для стандартного температурного режиму та температурного режиму вуглеводневої пожежі становить близько 12 %, а різниця між значеннями необхідної товщини вогнезахисного покриття для стандартного температурного режиму та температурного режиму тунельної пожежі за стандартами Нідерландів (RWS) – 29 %.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МЕТОДОЛОГІЧНОЇ БАЗИ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

Розроблено скінчено-елементні моделі для теплотехнічного та статичного розрахунків вогнезахищених залізобетонних конструкцій (на прикладі багатопустотного перекриття і колони) в програмному комплексі «ANSYS» та «ЛПРА-САПР». За допомогою розроблених моделей було проведено моделювання нестационарного прогріву та розрахунок напружено-деформованого стану вказаних конструкцій. Проведено порівняння результатів чисельного моделювання з результатами експериментального дослідження вогнестійкості. Запропоновано підхід, що дозволяє враховувати всі види теплообміну та навантаження шляхом задавання порожнин як твердого тіла з еквівалентним коефіцієнтом теплопровідності в багатопустотних перекриттях. Моделі дозволяють досліджувати стаціонарний та нестационарний прогрів як незахищених, так і вогнезахищених залізобетонних конструкцій. При визначенні ефективності розроблених моделей, було проведено порівняння результатів чисельного моделювання прогріву вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій з результатами їх експериментального дослідження вогнестійкості.

4.1 Апаратно-програмний комплекс оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій

В процесі виконання роботи запропоновано алгоритм та процедуру реалізації розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій: тепловий аналіз конструкцій, математичне моделювання конструкцій методом скінчених елементів;

визначення зусиль і деформацій в конструкціях; порівняння характеру деформацій реального об'єкту і математичної моделі й подальше уточнення, у разі потреби, характеристик жорсткості матеріалів елементів моделі; розрахунок уточненої моделі, визначення зусиль і переміщень; перевірка дотримання умов, які забезпечують несучу здатність і деформативність залізобетонних конструкцій, будівель та споруд.

На рис. 4.1 представлено керуючий алгоритм та процедуру реалізації розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій.



Рис. 4.1 Керуючий алгоритм та процедура реалізації розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій

Структурно-логічна схема реалізації запропонованого методу передбачає 9 блоків розташованих на 5 рівнях, пов'язаних логічними зв'язками та включає експериментальну і розрахункову частини. Експериментальна частина методу передбачає проведення серії випробувань на вогнестійкість при заданих режимах пожежі (стандартний, зовнішньої, вуглеводневої, тунельної, реальної пожежі) [246].

Розрахункова частина містить наступні обов'язкові процедури: побудову розрахункової моделі фізичного процесу [246]; ідентифікацію за даними випробувань на вогнестійкість теплофізичних характеристик моделі на основі розв'язання обернених задач теплопровідності; визначення характеристик вогнезахисної здатності покриттів за результатами випробувань на вогнестійкість вогнезахисених залізобетонних конструкцій при різних умовах випробувань (температурні режими пожежі, умови закріплення, навантаження зразків, схему вимірювання температур, кліматичні фактори), розрахунок напружено-деформованого стану конструкції [247].

4.2 Апробація розробленого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій

4.2.1 Оцінювання вогнестійкості вогнезахисеного залізобетонного перекриття

Для перевірки ефективності розробленого методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій побудована модель у програмному комплексі «ANSYS». Для цього були використані результати випробувань на вогнестійкість двох багатопустотних залізобетонних плит перекриття ПК 48-12-8 розмірами 4780×1190 мм та товщиною 220 мм. Плита має несучий сталевий каркас, який складається з п'ятих нижніх повздовжніх несучих арматурних стержнів 12 мм (марка арматури: попередньо напружена

A500С) та арматурної проволочки 4 мм Вр1. Бетон С12/15. Середнє значення товщини захисного шару бетону до нижньої несучої арматури склав 20 мм. Межа вогнестійкості плити за даними виробника становить REI 45. На зразки знизу та з боків плит за допомогою штукатурного агрегату наносили шар речовини із вогнезахисного покриття (штукатурки) товщиною 25,5 мм (зразок №1) та 26,4 мм (зразок №2). Середнє значення товщини нанесення 25,9 мм (рис. 5.2).

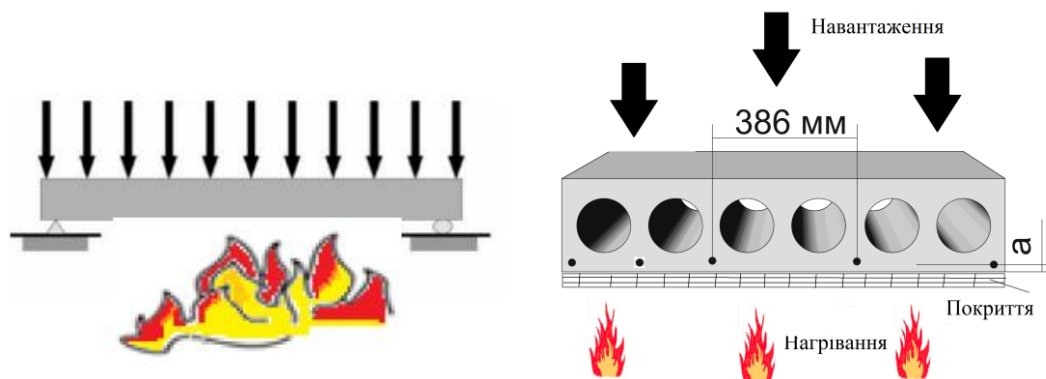


Рис. 4.2 Схема температурних та статичних навантажень на плиту для моделювання

Зразки встановлювали на горизонтальній печі, тобто шарнірно подвижна з одного боку плити та шарнірно не подвижна з іншого.

Навантаження здійснено каліброваними вантажами у вигляді бетонних блоків. Фактичне навантаження на зразки встановлено, виходячи з створення у плитах напружень, що відповідають напруженням від питомого розподільчого навантаження 570 кг/м^2 .

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

Температурний режим в печі був відтворений згідно стандартного температурного режиму пожежі.

Випробування згідно до замовлення тривали 242 хв. Для випробувань використовувалась спеціальна випробувальна піч та метрологічні повірені засоби вимірювальної техніки.

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

Під час випробувань втрати цілісності, теплоізолювальної здатності та несучої здатності обох зразків не відбулося.

Для більшості матеріалів, зазвичай, надаються дані щодо характеристик показників лише за кімнатної температури чи взагалі такі дані відсутні. Цей факт є однією з причин обмеженого використання розрахункових методів, заснованих на математичному моделюванні процесів теплообміну для вирішення задач теплового проектування вогнестійких конструкцій, а саме вогнезахисних залізобетонних конструкцій.

Використовуючи результати випробувань на вогнестійкість провели чисельне моделювання прогріву вогнезахисної багатопустотної плити перекриття в програмному комплексі «ANSYS».

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

Для розв'язання цього завдання було змодельовано поперечний переріз вогнезахисного багатопустотного залізобетонного перекриття, представленого на рис. 4.3.

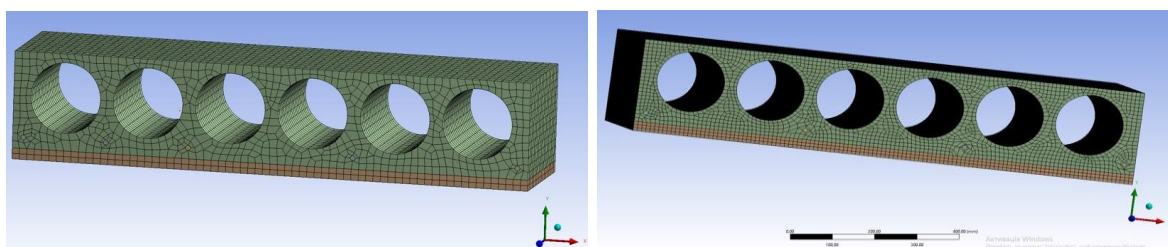


Рис. 4.3 Скінчено-елементна модель вогнезахисного багатопустотного залізобетонного перекриття в 3D постановці

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

Залізобетон є композиційним матеріалом, що складається з бетону та сталеві арматури, які працюють спільно, але мають різні механічні та реологічні властивості і в умовах високотемпературного нагріву змінюються неоднаково. В роботі застосовано «дискретний» підхід, що полягає в моделюванні арматури окремими стержнями. При цьому бетон та арматура моделюються об'ємними елементами. Такий підхід не вимагає прив'язки сітки скінчених елементів до кроку арматури, що дозволяє застосовувати його для завдань із реальними розмірами конструкції. Також є можливість враховувати характер спільної роботи бетону та арматури при нагріванні – поява зусиль через різницю температурних деформацій та інші ефекти. Такий підхід є доцільним при відтворенні випробувань на вогнестійкість.

Дія полум'я пожежі на залізобетонну конструкцію є нестационарним процесом, тому для отримання розподілу температурних полів у вогнезахищеній залізобетонній конструкції використовується нестационарний тепловий аналіз. Проектування вогнезахищеної залізобетонної плити перекриття виконувалось у модулі Design Modeller програми «ANSYS» з подальшим теплотехнічним розрахунком у модулі TRANSIENT THERMAL. Комп'ютерна модель вогнезахищеної залізобетонної плити перекриття, розроблена в програмному комплексі ANSYS, містить такі типи скінчених елементів: SOLID186, CONTA174, TARGE170 [248].

Коефіцієнт теплопровідності λ_a та питому теплоємність сталі c_a задавали згідно [147] і графіків, що зображено на рис. 4.4.

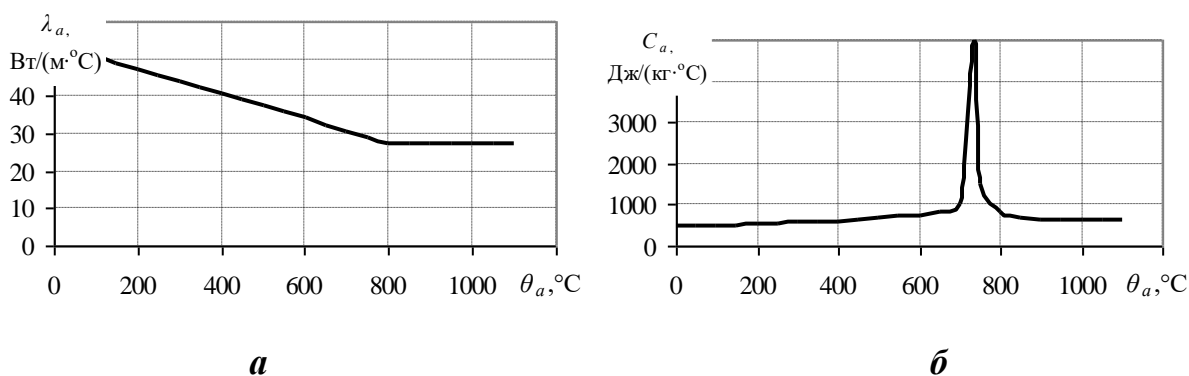


Рис. 4.4 Залежність коефіцієнту теплопровідності (а) та теплоємності (б) сталі від температури

Для визначення теплофізичних характеристик досліджуваного штукатурного покриття використовували результати випробувань на вогнестійкість, описані вище.

Згідно даних виробників вогнезахисної речовини коефіцієнт теплопровідності покриття в сухому стані дорівнює 0,11 Вт/(м·°C) при 20 °C.

Проте, зрозуміло, що для більшості вогнезахисних матеріалів теплофізичні характеристики залежать від температури внаслідок фізико-хімічних процесів, що протікають у них під час нагрівання [249].

Результати розрахунків по визначенню теплофізичних характеристик штукатурного складу, які залежать від температури, показано на рис. 4.5.

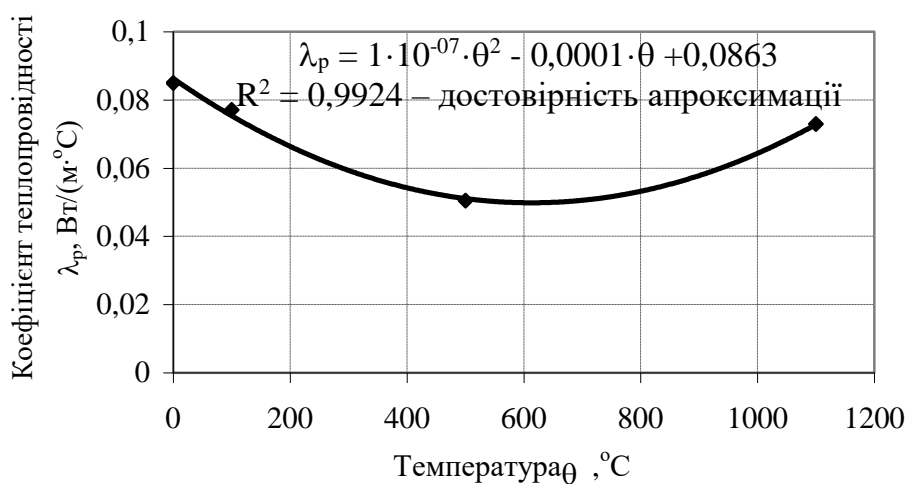


Рис. 4.5 Залежність ефективного коефіцієнта теплопровідності штукатурного покриття від температури, знайденого розв'язанням обернених задач теплопровідності за даними випробувань на вогнестійкість

Із рис. 4.5 випливає, що коефіцієнт теплопровідності матеріалу зі збільшенням температури (до 600 °C) зменшується, а у подальшому його значення зростає. Зменшення коефіцієнта теплопровідності можна пояснити тим, що в цьому діапазоні температур у матеріалі утворюється структура, яка має теплопровідність меншу, ніж у матеріалі, який не зазнавав теплового впливу. Подальше збільшення коефіцієнта теплопровідності пояснюється зростанням радіаційної складової цього коефіцієнту, яке пов'язане з підвищенням інтенсивності теплообміну через структуру такого матеріалу.

Питома об'ємна теплоємність покриття була знайдена розв'язанням обернених задач теплопровідності і склала 2000 Дж/(кг·°C). При цьому густина покриття складала $\rho_p=500$ кг/м³. Закономірність поведінки коефіцієнту теплопровідності вогнезахисного покриття описується регресійною залежністю виду: $\lambda_p=1\cdot 10^{-07}\cdot\theta^2-0,0001\cdot\theta+0,0863$ з достовірністю апроксимації 0,9924 (рис. 4.5).

Особливо слід відмітити ту обставину, що для знаходження теплофізичних характеристик покриття використовували середні значення температур з необігрівної поверхні вогнезахисного багатопустотного залізобетонного перекриття.

Коефіцієнт теплопровідності бетону перекриття та питому об'ємну теплоємність також було знайдено розв'язанням обернених задач теплопровідності за результатами вогневих випробувань [247] (рис. 4.6).

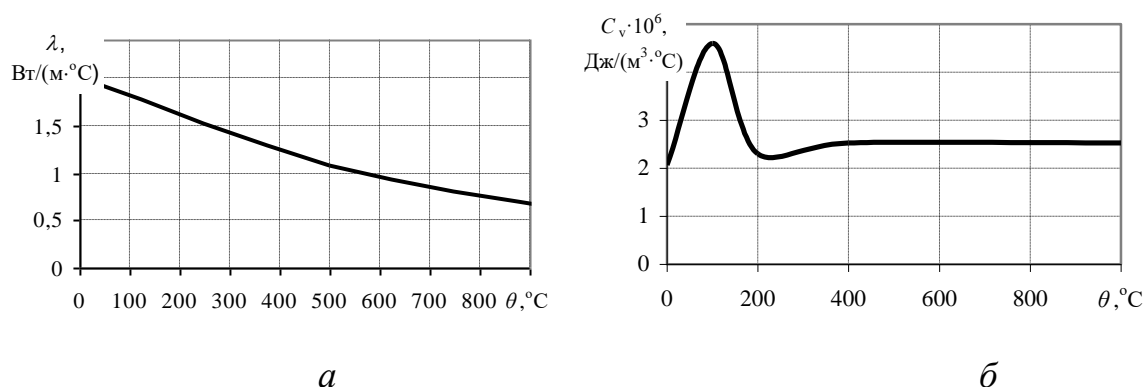


Рис. 4.6 Коефіцієнт теплопровідності (а) та питома об'ємна теплоємність (б) бетону

Як видно із рис. 4.6, викликана температурою зміна властивостей у бетоні набагато складніша, ніж в арматурі через міграцію вологи, процеси волого та газообміну, а також значні зміни компонентів у різних видах бетону. Температура в першій фібрі бетонного перерізу за час прогріву при стандартному температурному режимі пожежі за 240 хвилин змінюється від початкової 20 °C до приблизно 200 °C. Тому і всі теплофізичні та механічні властивості бетону задавалися у цьому температурному інтервалі.

Інші параметри для моделювання теплового стану вогнезахищеного залізобетонного перекриття:

Φ – кутовий коефіцієнт, $\Phi = 1,0$;

ε_m – коефіцієнт теплового випромінювання обігрівної поверхні покриття, $\varepsilon_m = 0,7$;

ε_f – коефіцієнт теплового випромінювання полум'я, $\varepsilon_f = 1,0$;

ρ_a – густина сталі, $\rho_a = 7850 \text{ кг/м}^3$;

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

θ_0 – початкова температура, $\theta_0 = 20 \text{ °C}$;

густина бетону 2300 кг/м^3 .

В результаті чисельного моделювання, розв'язанням прямих задач теплопровідності були отримані розподіли температур у вогнезахищеному багатопустотному залізобетонному перекритті. На рис. 4.7 показано температурний розподіл вогнезахищеного перекриття на 60 та 120 хвилині вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі [250].

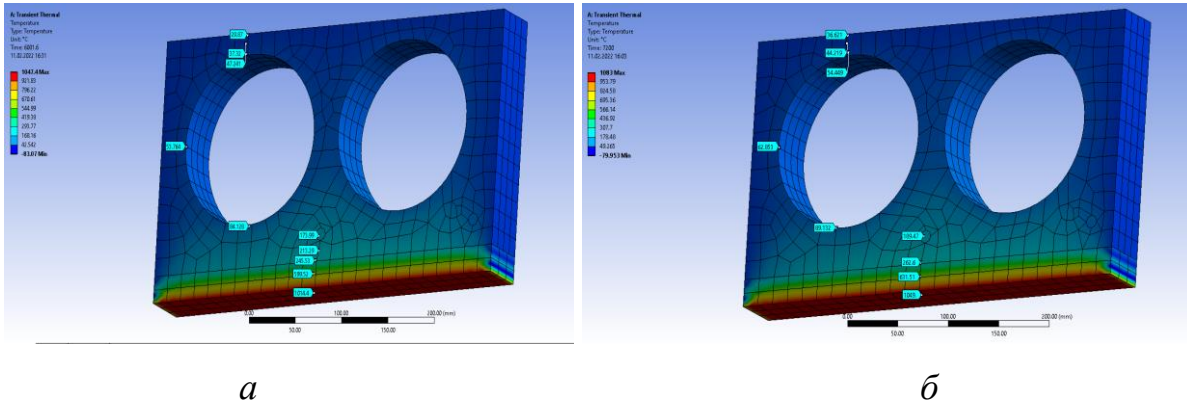


Рис. 4.7 Розподіл температур у фрагменті вогнезахищеної залізобетонної плити перекриття на 60 (а) та 120 (б) хвилині її випробування за стандартного температурного режиму пожежі

Особливий акцент під час вивчення полів температур, зображених на рис. 4.7, слід звернути на прогрівання порожнин багатопустотного залізобетонного перекриття. Правильність задавання теплофізичних та механічних характеристик саме цього шару найбільше впливає на точність моделювання. Необхідно зазначити, що для знаходження еквівалентного коефіцієнта

теплопровідності шару з порожнинами існує декілька підходів. Перший підхід базується на задаванні в порожнинах повітря з його характеристиками. У випадку другого підходу можливо реалізувати відсутність конвективного і радіаційного теплообміну, проте це призводить до великих похибок. І третій підхід дозволяє враховувати всі види теплообміну шляхом задавання порожнин як твердого тіла з еквівалентним коефіцієнтом теплопровідності, що в кожному випадку розраховують окремо [251].

На рис. 4.8 зображено розподіл температур в вогнезахисній багатопустотній залізобетонній плиті перекриття на 180 та 240 хвилині її випробування.

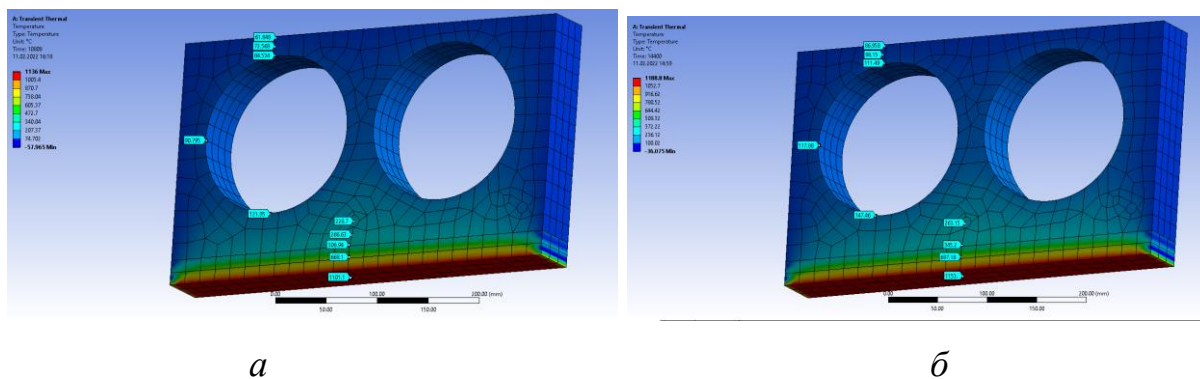


Рис. 4.8 Розподіл температур у фрагменті вогнезахисної залізобетонної плити на 180 та 240 хвилині її випробування

Як видно із рис. 4.8, розрахункові температури задовільно корелюють з експериментальними даними.

Підтвердженням адекватності розробленої моделі є дані рис. 4.9 та табл. 4.1, на яких видно задовільну збіжність експериментальних та розрахункових температур.

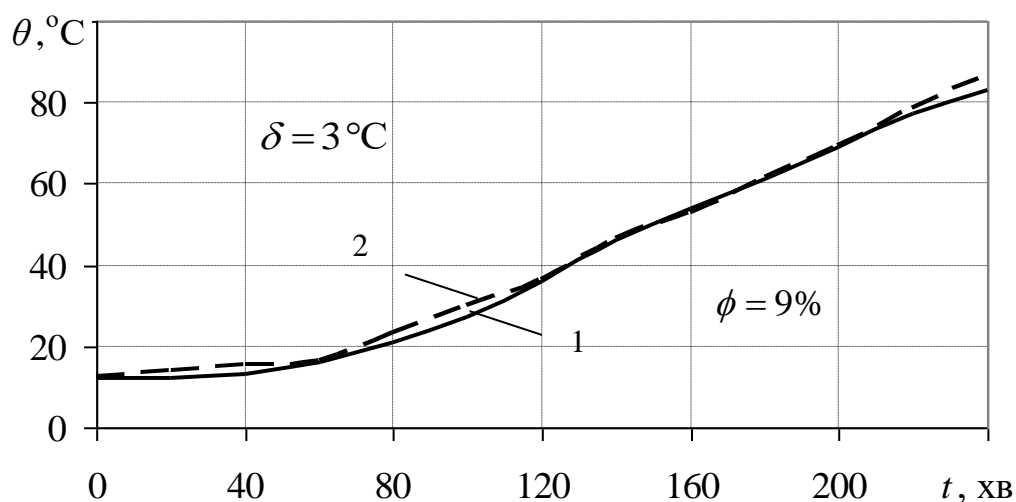


Рис. 4.9 Залежність температури від часу вогневого впливу з необігрівної поверхні залізобетонного вогнезахисеного перекриття: 1 – експериментальна температура з необігрівної поверхні; 2 – розрахункова температура, отримана моделюванням в програмному комплексі «ANSYS».

Таблиця 4.1

Порівняння експериментальних та чисельних результатів

Час, хв.	T (1–5) сер., °C (експеримент)	ANSYS, °C (розрахунок)	Відхилення, °C	Похибка, %
0	12	12,391	0,4	3,3
20	12	14,226	2,2	9
40	13	15,486	2,5	9
60	16	16,586	0,6	3,7
80	21	23,403	2,4	10
100	27	29,87	3	8,9
120	36	36,621	0,6	1,7
140	46	46,527	0,5	1,6
160	54	52,781	2,8	3,3
180	61	61,848	0,8	1,4
200	69	69,435	0,4	0,6
220	77	78,613	1,6	2,1
240	83	86,958	4	4,6

Виходячи з результатів, зображених на рис. 4.9, та даних, вказаних в табл. 4.1, можна констатувати правильність побудови моделі в програмному середовищі «ANSYS», правильність задавання параметрів, початкових та граничних умов. Для доведення цього твердження достатньо дослідити характер кривих зміни температури з необігрівної поверхні вогнезахищеного залізобетонного перекриття від часу вогневого впливу (рис. 4.9).

Як зображено на рис. 4.9 найбільша область відхилення у вимірюванні температур спостерігалася на 100 хвилині розрахунку і становила близько 3°C, що складає 9%. Це означає, що врахування всіх параметрів при побудові комп'ютерної моделі теплових процесів в системі «залізобетонне перекриття – вогнезахисне покриття» відкриває можливість для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій з прикладенням навантаження в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму пожежі.

Отримані результати не розходяться з експериментальними даними (рис. 4.9, крива 1), оскільки розрахункова крива (рис. 4.9, крива 2) зміни температури від часу вогневого впливу з необігрівної поверхні вогнезахищеного перекриття добре корелює з експериментальною. Це в свою чергу свідчить про задовільну адекватність розробленої 3D-моделі для теплотехнічного розрахунку теплового стану вогнезахищеного залізобетонного перекриття і свідчить про правильність розробленої моделі, чого неможливо досягнути, використовуючи інші підходи у разі задавання теплообміну в порожнинах перекриття. Підходи, що базуються на задаванні в порожнинах повітря з його характеристиками та відсутністю конвективного і радіаційного теплообміну, призводять до великих похибок в обчисленні (до 50 %).

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

Алгоритм розрахунку являв собою систему рівнянь визначення температури у кожному вузлі координатної сітки, що накладають на переріз.

Координатну сітку накладено так, щоб її вузли розташовувалися не тільки в товщині перерізу, але і по його периметру. Також вузли необхідно розміщувати у центрі стержнів для конструкцій з гнучкою арматурою і по довжині полиць та стінки в середині їхньої товщини для конструкцій з жорсткою арматурою. Крок сітки рекомендовано задавати в межах 0,01–0,03 м, але обов'язково він повинен бути більшим за максимальний діаметр робочої арматури.

Одним з найважливіших етапів скінчено-елементного аналізу є побудова сітки скінчених елементів. Точність розрахунку за допомогою методу скінчених елементів залежить від правильного вибору типів та розмірів елементів. Була обрана прямокутна сітка з чотирма вузлами, що дає точніші результати, ніж сітка з трикутними елементами, що пояснюється наступним чином. Дрібна сітка потрібна там, де очікується великий градієнт деформацій чи напруг (отвір, виточення, тріщина тощо). У той же час, сітка великих розмірів може застосовуватися в зонах з відмінними деформаціями або напруженнями, що мало змінюються, а також в областях, що не становлять особливої цікавості для розрахунків. У зв'язку з цим, перед створенням скінчено-елементної сітки необхідно виділити передбачувані області концентрації напружень.

Точність результатів розрахунків зменшується, якщо суттєво різняться розміри сусідніх елементів поблизу концентратора напруження.

Скінчені елементи в вогнезахищеному залізобетонному перекритті приймалися розміром 2 товщини (тобто для плити товщиною 200 мм розмір кінцевого елемента приймався рівним 400×400 мм). Розмір скінченого елемента плити перекриття задавався не більше $1/6$ прольоту плити, але не менше ніж $1/15$ прольоту плити. Було задано 10 скінчених елементів на проліт плити перекриття.

Таким чином, сітка скінчених елементів має в основі наближені до квадратів елементи, що є для розрахунку матриці ідеальним варіантом, довжина елементів не перевищує $1/10$ розміру поперечного перерізу, що відповідає рекомендації по формуванню сітки скінчених елементів. Зменшення розмірів

приведе до збільшення значної кількості скінчених елементів, а це призведе до збільшення часу розрахунку і використання більш потужної обчислювальної техніки, а на аналіз результатів впливу не матиме.

Було змодельовано поперечний переріз вогнезахищеної конструкції в 15-ій ознаці схеми (рис. 4.10).

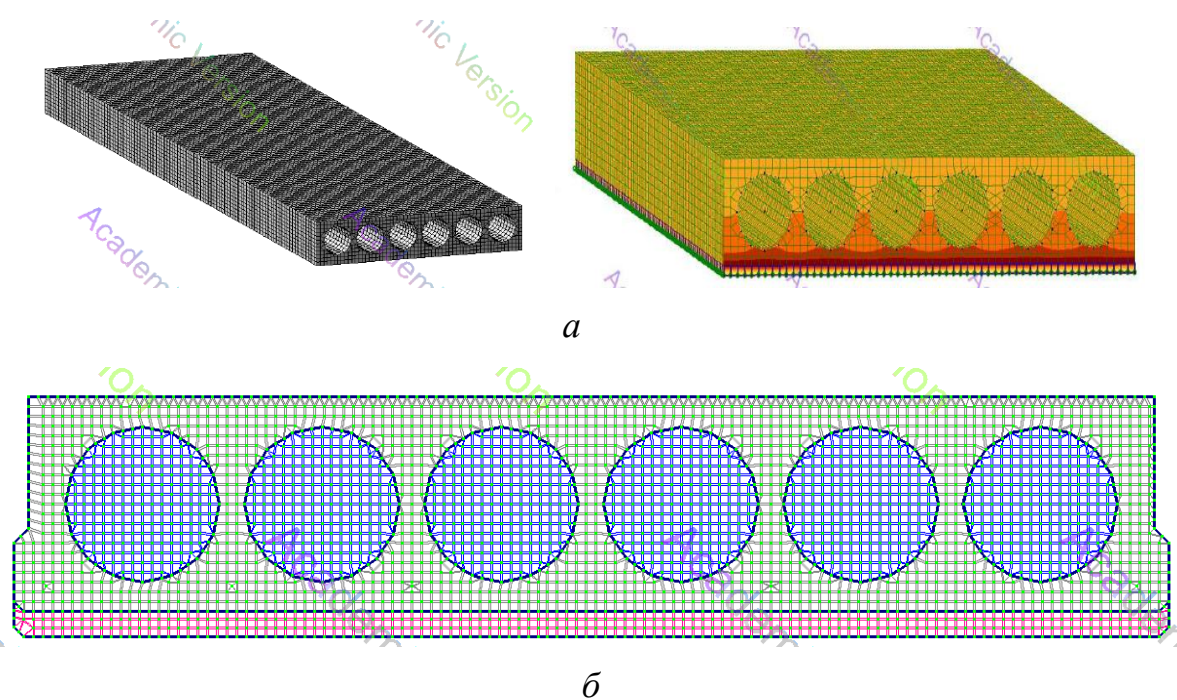


Рис. 4.10 Скінчено-елементна модель вогнезахищеного багатопустотного залізобетонного перекриття в 3D (а) і 2D (б) постановці

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

Змодельованим елементам було призначено типи жорсткості (табл. 4.2).

Таблиця 4.2

Характеристики жорсткості для моделювання

№ з/п	Ім'я	Коментар	H , см	λ , Вт/(м·°С)	C_p , Дж/(кг·°С)	R_0 , Н/м ³
1	Теплопровідність	Бетон	100	1,3	970	23030
2	Теплопровідність	Повітря	100	3,18	950	12,76
3	Теплопровідність	Вогне-захист	100	0,071	2000	4903
4	Конвекція	Поверхня обігріву	100	$a=25$ Вт/(м ² ·°С)	–	–

На третьому етапі задавали зовнішнє навантаження. Для цього у завантаженні 1 виділили всі вузли схеми і задали в них навантаження, яке буде відповідати вихідній температурі конструкції – 20°C. Після задавання навантаження на вузли вони забарвлюються в зелений колір. В розрахункову схему були включені такі типи скінчених елементів (СЕ): 210 – фізично нелінійний універсальний просторовий стержневий СЕ; 231 – фізично нелінійний паралелепіпед; 234 – фізично нелінійний універсальний просторовий шестивузловий ізопараметричний СЕ.

За допомогою розробленої моделі проведено теплотехнічний розрахунок вогнезахищеного багатопустотного залізобетонного перекриття в умовах його випробування при стандартному температурному режимі пожежі. В результаті моделювання вогнезахищене залізобетонне перекриття було розбите на 4 шари, кожному з якого задано теплофізичні та механічні характеристики, знайдені за результатами випробувань на вогнестійкість. Такий підхід є більш точнішим, підходом у порівнянні з задаванням характеристик із табличних даних або Єврокодів.

Дія полум'я пожежі на залізобетонну конструкцію є нестационарним процесом, тому для отримання розподілу температурних полів у вогнезахищеній залізобетонній конструкції використовується нестационарний тепловий аналіз. Проектування вогнезахищеної залізобетонної плити перекриття виконувалось у модулі «Теплопровідність» програми «ЛІРА-САПР».

Для розрахунків нерівномірних розподілів температури в поперечному перерізі вогнезахищеного залізобетонного перекриття застосовували математичну модель нестационарної теплопровідності, математичний апарат якої використано в програмі «ЛІРА-САПР». Модель являє собою диференційне рівняння теплопровідності, яка враховує радіаційно-конвективний теплообмін від газового середовища до обігрівної поверхні вогнезахищеного перекриття (граничні умови III-го роду), кондуктивний теплообмін в перекритті і радіаційно-конвективний теплообмін з боку необігрівної поверхні перекриття

(граничні умови III-го роду). Для розв'язання рівняння теплопровідності використовувався метод скінчених елементів, реалізований в програмі «ЛІРА-САПР», для якого більшість верифікаційних тестів для згинальних конструкцій дають похибку в межах 5 %, а для стержневих – менше 1 %.

В результаті чисельного моделювання, розв'язанням прямих задач теплопровідності були отримані розподіли температур у вогнезахищеному багатопустотному перекритті в будь-якій точці перерізу. На рис. 4.11 показано розподіл температури на 120 хвилині вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі [251].

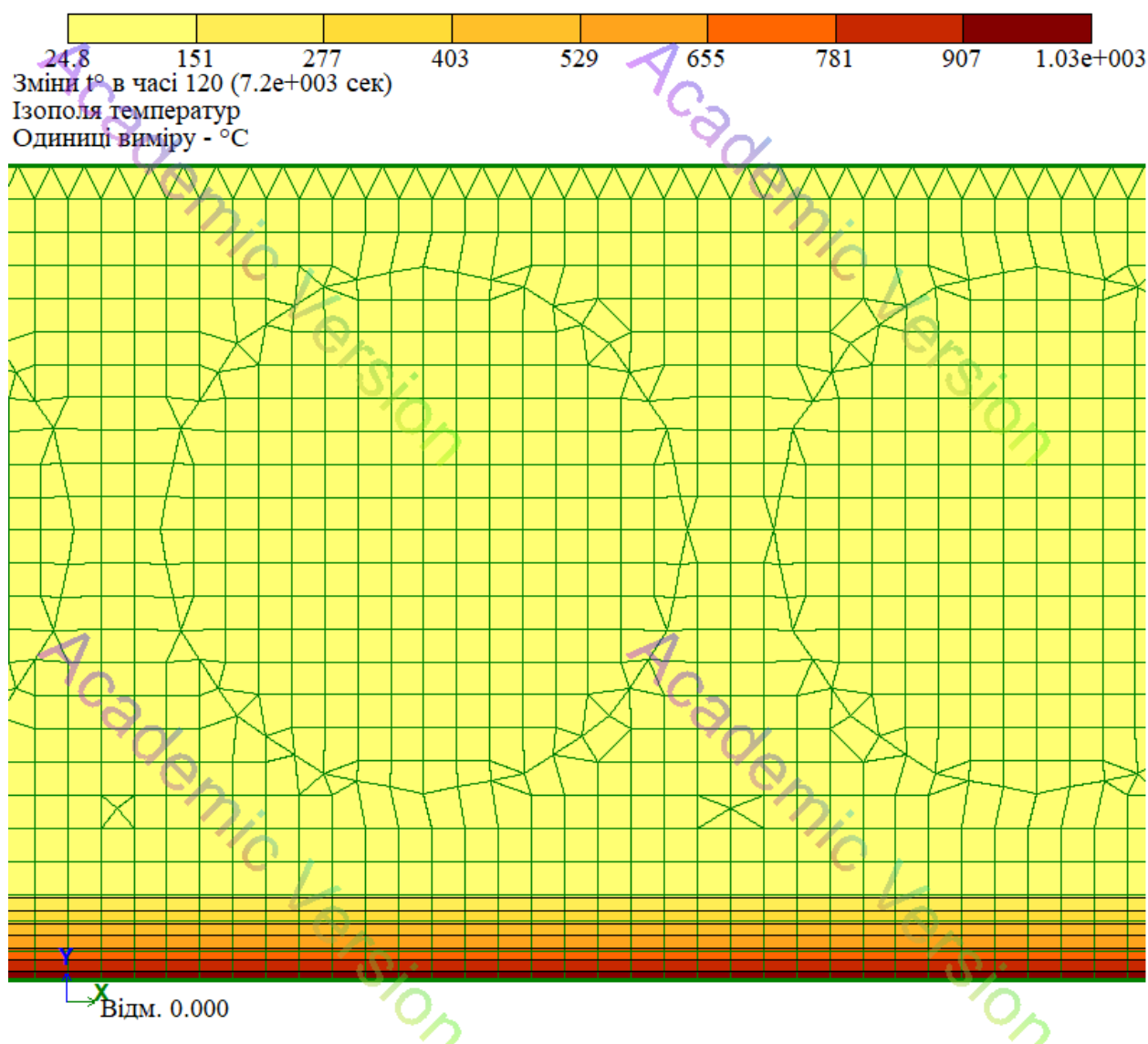


Рис. 4.11 Розподіл температур у фрагменті вогнезахищеного залізобетонного перекриття на 120 хвилині випробування

На рис. 4.12 зображено розподіл температур в вогнезахищеній залізобетонній плиті перекриття на 240 хвилині її випробування.

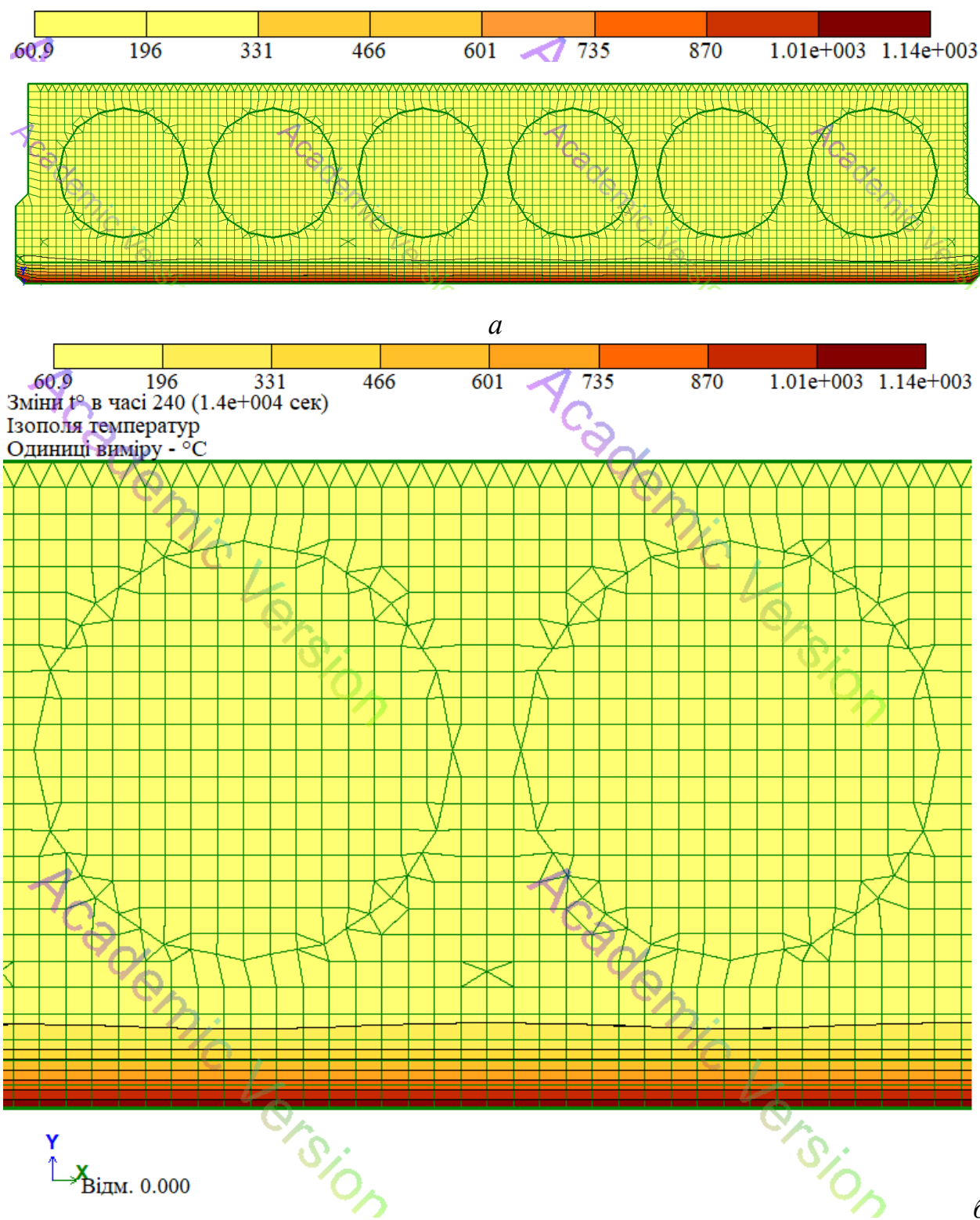


Рис. 4.12 Розподіл температур у вогнезахищеній залізобетонній плиті перекриття на 240 хвилині її випробування: *а* – вогнезахищене залізобетонне перекриття; *б* – фрагмент вогнезахищеного залізобетонного перекриття

Результати чисельного моделювання нестационарного прогрівання вогнезахищеного залізобетонного перекриття в програмі «ЛІРА-САПР» порівняли з експериментальними випробуваннями у вогневій печі. Дані, представлені на рис. 4.12, а саме: температури з необігрівної поверхні вогнезахищеного залізобетонного перекриття, співпадають з результатами експерименту. Це підтверджують дані, представлені на рис. 4.13, де показані температури з необігрівної поверхні вогнезахищеного залізобетонного перекриття, отримані експериментально та в результаті чисельного моделювання.

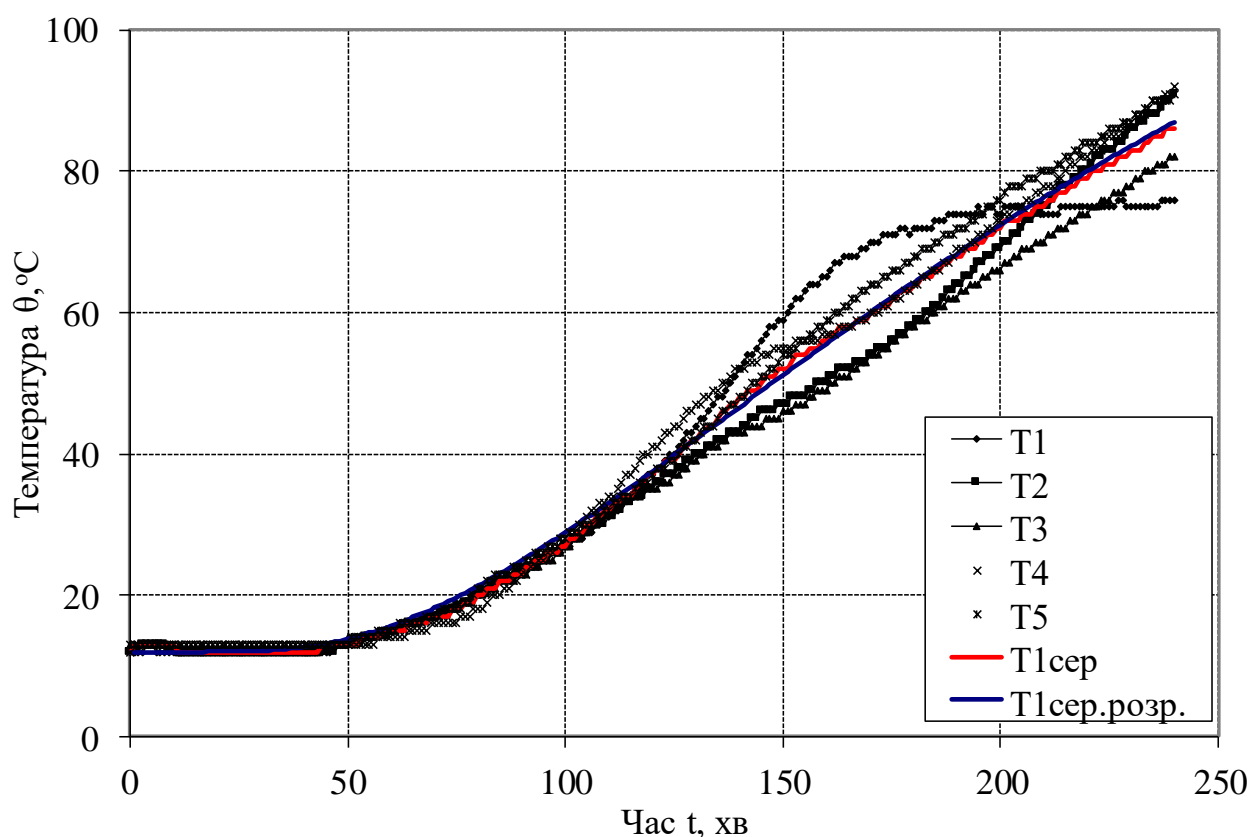


Рис. 4.13 Залежність температури з необігрівної поверхні вогнезахищеного залізобетонного перекриття від часу вогневого впливу: T_1 – T_5 – температури в геометричних центрах чвертей залізобетонного перекриття, отримані експериментально; $T_{1\text{сер}}$ – експериментальна середня температура; $T_{1\text{сер.розн.}}$ – середня температура, отримана в результаті чисельного моделювання

Як видно із рис. 4.13, експериментальна ($T_{\text{сер.}}$) та розрахункова ($T_{\text{сер.розр.}}$) температури мають задовільну збіжність, що видно із кривих залежності температури від часу вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі.

Як видно з рис. 4.14, розрахункова крива $T_{\text{сер.розр.}}$ співпадає з експериментальною кривою $T_{\text{сер.}}$. При цьому найбільше відхилення температури від експериментальних значень спостерігалось на 160–180 хвилинах розрахунку і становило $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, що відповідає похибці не більше 8,7%. Це свідчить про правильність задавання параметрів моделі теплових процесів в системі «залізобетонне перекриття – вогнезахисне покриття».

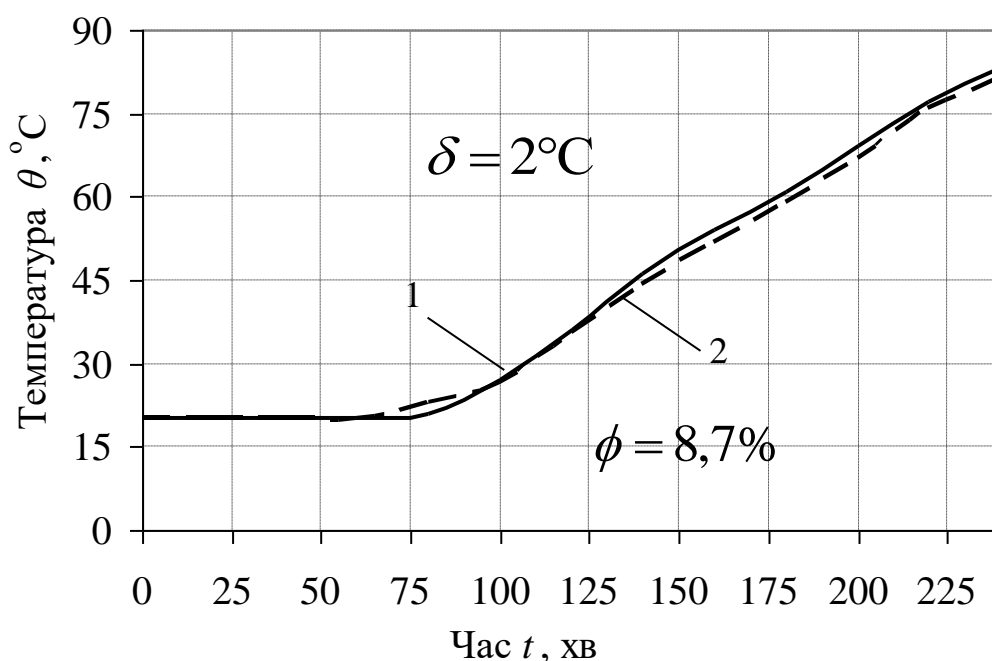


Рис. 4.14. Залежність температури від часу вогневого впливу з необігрівної поверхні перекриття зі штукатурним покриттям: 1 – експериментальна температура з необігрівної поверхні; 2 – розрахункова температура, отримана моделюванням в програмному комплексі «ЛІРА-САПР»

Як видно із рис. 4.14 крива 2 зміни температури від часу вогневого впливу з необігрівної поверхні перекриття зі штукатурним покриттям добре корелює з експериментальною кривою 1. Це в свою чергу говорить про задовільну

адекватність розробленої 2D-моделі при теплотехнічному розрахунку теплового стану вогнезахисного залізобетонного перекриття.

Все це вказує на правильність задавання початкових та граничних умов, побудови комп'ютерної моделі теплових процесів в системі «залізобетонне перекриття – вогнезахисне покриття». В кінцевому випадку доводить працездатність розробленої моделі для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. Доводить адекватність реальним процесам, що відбуваються при нагріванні вогнезахисних залізобетонних конструкцій з прикладенням навантаження в умовах вогневого впливу за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі. Під час проведення експериментів зміни температури фіксувалися в контрольних точках через кожну хвилину. Однак, зважаючи на великий обсяг даних, в табл. 4.3 наведено тільки результати, які фіксувалися з кроком 20 хв.

Таблиця 4.3

Порівняння експериментальних та чисельних результатів

Час, хв.	T (1–5) сер., °C (експеримент)	ЛПРА-САПР, °C (розрахунок)	Відхилення, °C	Похибка, %
0	20	20	0	0
20	20	20	0	0
40	20	20	0	0
60	20	20	0	0
80	21	23	2	8,7
100	27	26,6	0,4	1,5
120	36	35,5	0,5	1,4
140	46	44,3	1,7	3,7
160	54	51,8	2,2	4,1
180	61	59,1	1,9	3,2
200	69	67	2	2,9

Продовження таблиці 4.3				
220	77	75,8	1,2	1,6
240	83	81,5	1,5	1,8

Особливістю розробленої скінченно-елементної моделі є можливість теплотехнічного та статичного розрахунку вогнезахисних залізобетонних конструкцій з урахуванням характеристик матеріалів, з яких складається конструкція. Модель дозволяє досліджувати фізичні процеси, що відбуваються в вогнезахисних залізобетонних конструкціях. При цьому, за допомогою розробленої моделі можливо враховувати різні чинники, що впливають на вогнезахисні залізобетонні конструкції. До таких чинників можна віднести: температурні режими пожежі [252], теплофізичні характеристики залізобетонних конструкцій та покриттів для вогнезахисту залізобетонних конструкцій [253].

Наступним етапом було моделювання напружено-деформованого стану вогнезахисного залізобетонного перекриття. Для цього в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» була побудована модель (рис. 4.15) та прикладені навантаження $5,7 \text{ кН/м}^2$ і власна вага перекриття.

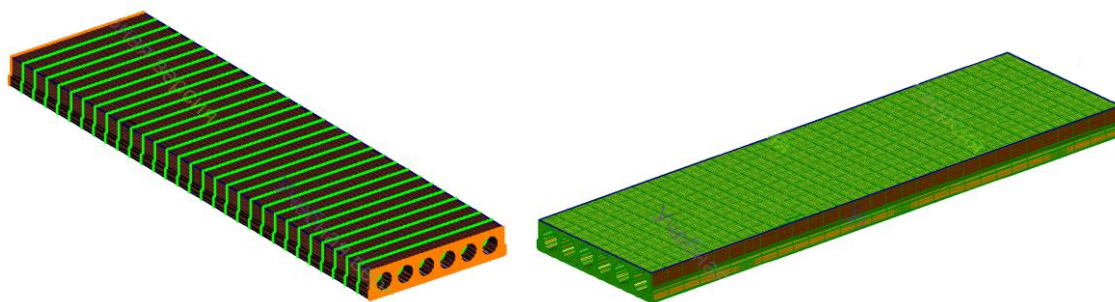


Рис. 4.15 Комп'ютерна модель напружено-деформованого стану вогнезахисного залізобетонного перекриття

У програмному комплексі «ЛІРА-САПР» було виконано скінченно-елементний аналіз розглянутого вогнезахисного залізобетонного перекриття. Розрахунок проводився із врахуванням фізичної нелінійності, при формуванні наступних параметрів (рис. 4.16).

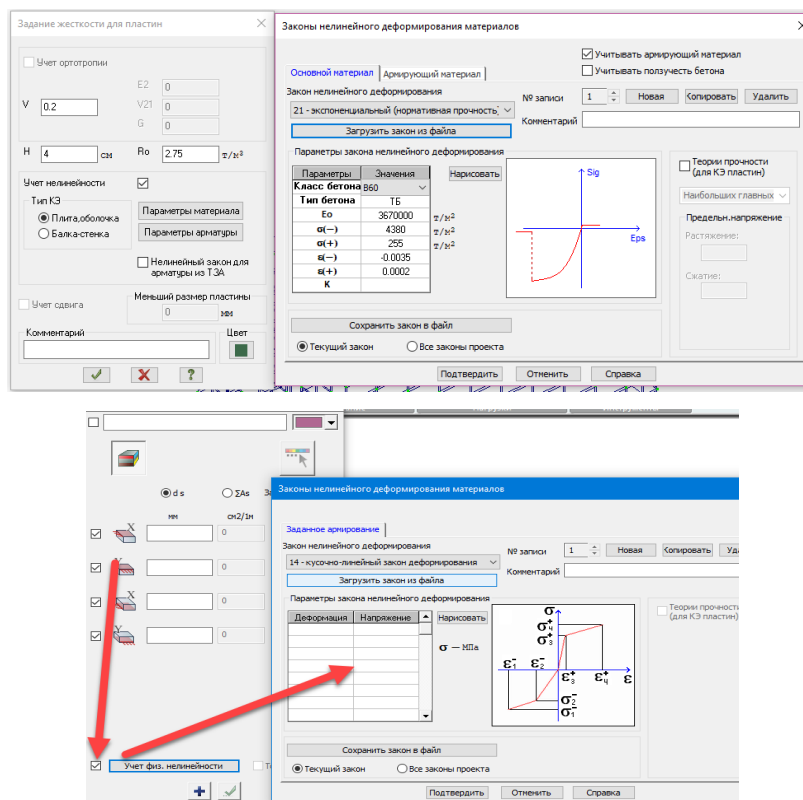


Рис. 4.16 Формування закону нелінійних деформацій

При розрахунку конструкції з урахуванням повзучості враховуються нелінійні деформації. Для врахування нелінійності був обраний простий кроковий метод з кількістю кроків рівним 30. Для виконання нелінійного розрахунку з урахуванням статичного закону повзучості в часі (EuroCode prEN 1992-1-1), попередньо обчислюється коефіцієнт повзучості φ_0 і коефіцієнт β_H , які залежать від відносної вологості (R_H , %) і умовного розміру перерізу (h_0 , мм). В задачах механіки пружного тіла лінійність завжди являлась наслідком:

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

На рис. 4.17 показані закони нелінійного деформування бетону, що застосовуються в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» (11 – експоненціальний закон деформування; 14 – кусково-лінійний закон деформування).

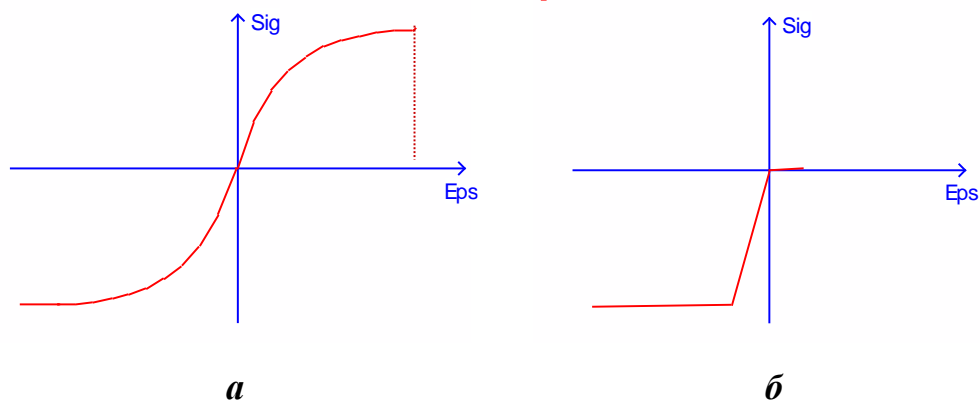


Рис. 4.17 Закони нелінійного деформування бетону: а – експонентний; б – кусково-лінійний

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

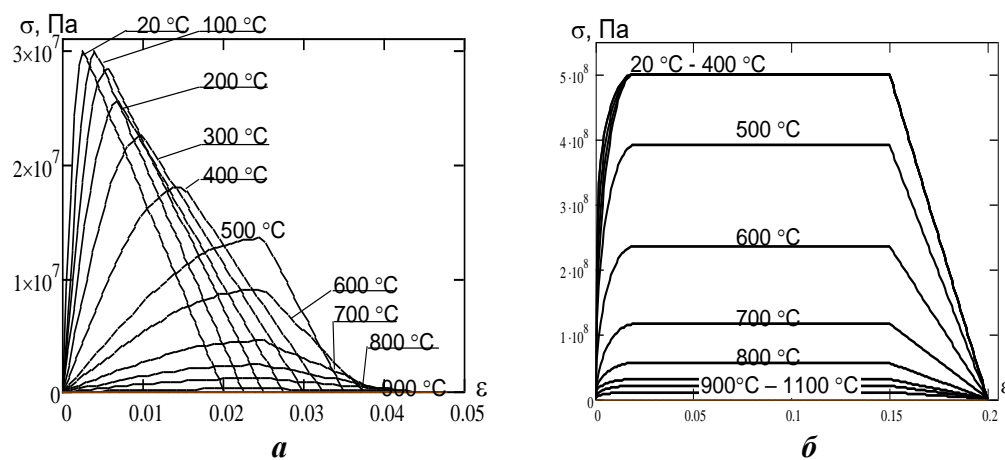
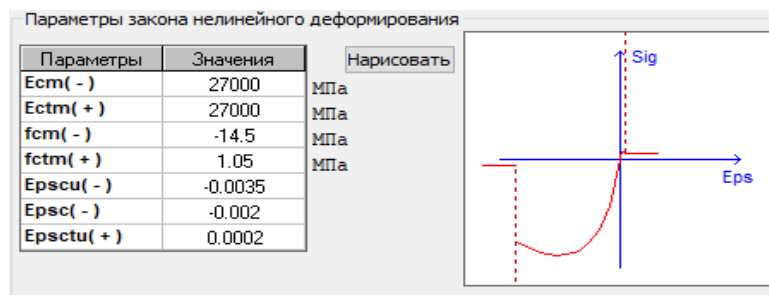
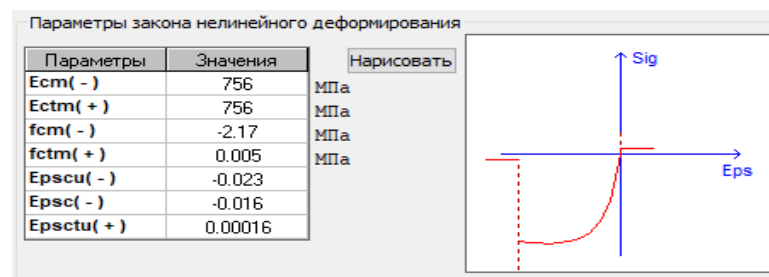


Рис. 4.18 Діаграми деформування бетону (а) та арматурної сталі (б): σ – напруження, ε – відносна деформація

На рис. 4.19 показаний приклад порівняння змін характеристик матеріалу (граничної міцності на стиск, розтяг та граничних деформацій) в залежності від температури.



а



б

Рис. 4.19 Порівняння параметрів деформування бетону при температурі:
а – 20 °С; б – 800 °С

Застосовані закони деформування матеріалів моделі (рис. 5.17), а саме: експоненціальний та кусково-лінійний, які враховують модуль пружності бетону, коефіцієнт лінійної температурної деформації бетону, граничну відносну деформацію бетону.

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

модуль пружності бетону:

E_c , (20 °С)= $1,2 \cdot 10^4$ МПа початковий модуль пружності бетону;

E_c , (200 °С)= $1,14 \cdot 10^4$ МПа модуль пружності бетону при 200 °С;

$k(200)=0,95$ – коефіцієнт зниження для міцності або деформативності за температури θ ;

E_c , (400 °С)= $0,9 \cdot 10^4$ МПа модуль пружності бетону при 400 °С;

$k(400)=0,75$;

E_c , (600 °C)=0,54·10⁴ МПа модуль пружності бетону при 600 °C;
 $k(600)=0,45$;

E_c , (800 °C)=0,18·10⁴ МПа модуль пружності бетону при 800 °C;
 $k(800)=0,15$;

E_c , (1000 °C)=0,048·10⁴ МПа модуль пружності бетону при 1000 °C;
 $k(1000)=0,04$.

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

коефіцієнт лінійної температурної деформації бетону та сталі:

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

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

гранична відносна деформація бетону:

$$\varepsilon_{cul} (20 \text{ °C})=0,02;$$

$$\varepsilon_{cul} (200 \text{ °C})=0,025;$$

$$\varepsilon_{cul} (400 \text{ °C})=0,03;$$

$$\varepsilon_{cul} (600 \text{ °C})=0,035;$$

$$\varepsilon_{cul} (800 \text{ °C})=0,04;$$

$$\varepsilon_{cul} (1000 \text{ °C})=0,045.$$

Температурне розширення

Бетон на силікатному заповнювачі:

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

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

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

Модель складається з 52206 вузлів та 48599 елементів. Крок розбиття по перерізу склав $h=0,01$ м, часовий крок $\Delta t=60$ с.

На рис. 4.20 зображено результати статичного розрахунку в програмному комплексі «ЛПРІ-САПР». Як видно із рис. 4.20 прогин залізобетонного перекриття в середній частині плити був 39,8 мм, що задовільно корелює з експериментальними результатами (42 мм), а похибка не перевищує 5 %.

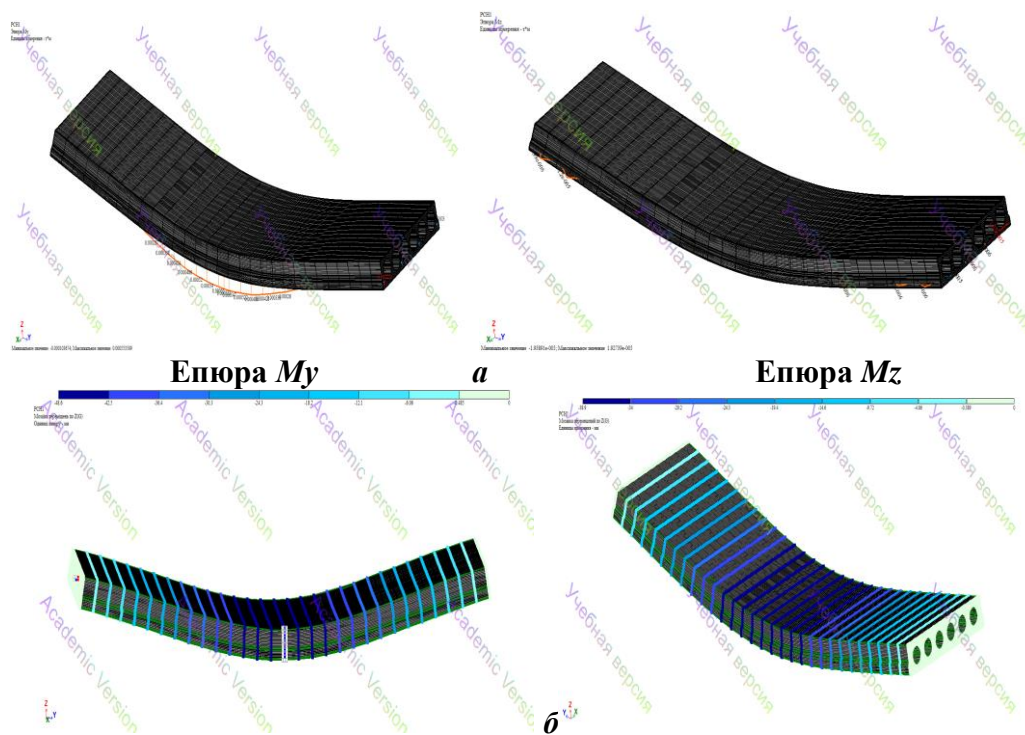


Рис. 4.20 Епюри моментів (а) та прогини (б) залізобетонної плити перекриття

Підтвердженням адекватності розробленої комп'ютерної моделі є дані рис. 4.21, на якому видно задовільну збіжність експериментальних та розрахункових значень прогину залізобетонного вогнезахисеного перекриття по середині прольоту за умови впливу стандартного температурного режиму пожежі.

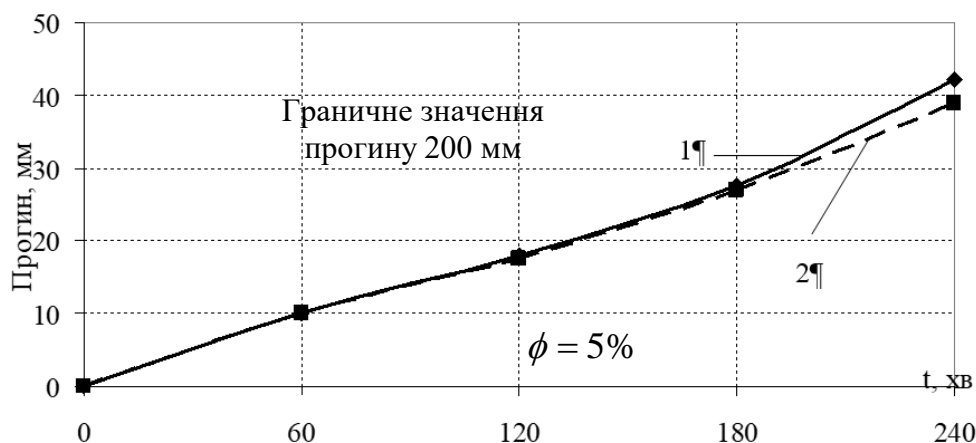


Рис. 4.21 Прогин залізобетонного вогнезахисеного перекриття по середині прольоту за умови впливу стандартного температурного режиму пожежі: 1 – експеримент; 2 – розрахунок в програмному комплексі «ЛІРА-САПР»

Як зображено на рис. 4.21, найбільша область відхилення у значеннях прогину спостерігалася на 200 хвилині розрахунку, і становило близько 3 мм, що відповідає похибці 5 %. Це означає, що врахування всіх параметрів для побудови комп'ютерної моделі теплових процесів та напружено-деформованого стану в системі «залізобетонне перекриття – вогнезахисне покриття» відкриває можливість для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій з прикладенням навантаження в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму пожежі.

В результаті досліджень узагальнено можливості роботи комп'ютерної програми «ЛІРА-САПР» в області розрахунку та моделювання вогнестійкості будівельних конструкцій, обґрунтована необхідність виконання досліджень за допомогою цієї програми, обґрунтована можливість впровадження даної програми при введенні будівель в експлуатацію [247], дослідження вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій експлуатованих будівель та споруд [254, 255] та споруд із вібронавантажених конструкцій [256].

4.2.2 Оцінювання вогнестійкості вогнезахисної залізобетонної колони

Для перевірки ефективності розробленого методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій побудована модель вогнезахисної залізобетонної колони в програмному комплексі «ЛІРА-САПР». Для цього були використані результати випробувань на вогнестійкість двох зразків-фрагментів залізобетонних колон квадратного перерізу, фактичним розміром 600×600 мм та висотою 2000 мм (рис. 4.22).

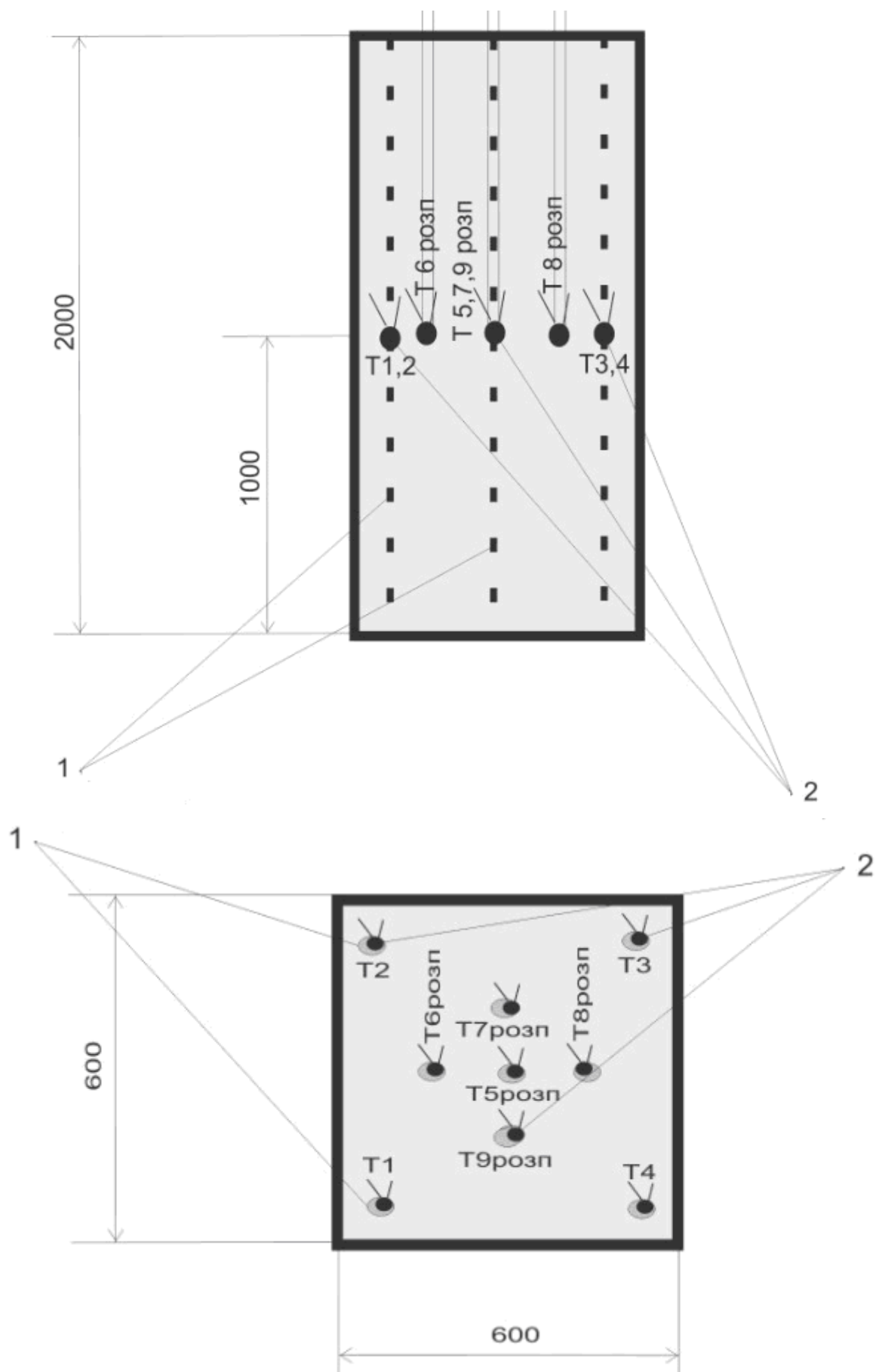


Рис. 4.22 Схема розташування термопар на зразку: 1 – несучі арматурні стержні; 2 – термопари

Кожний зразок мав несучий каркас, що складався з 16-ти вертикальних несучих арматурних стержнів $\text{Ø}20$ мм А400С. Арматура зв'язку $\text{Ø}10$ мм А400С у кількості 26 штук закладалась по зовнішньому контуру несучих арматур та арматура зв'язку $\text{Ø}10$ мм А400С у кількості 6 штук закладалась між центральними боковими арматурами. Бетон класу С25.

За результатами обстеження зразків після випробування, фактичне середнє значення товщини захисних шарів до вісі несучої арматури складало 51 мм. Випробування проводилося в умовах стандартного температурного режиму пожежі. Результати вимірювань температур несучої арматури та температури по перерізу зразків наведено на рис. 4.23.

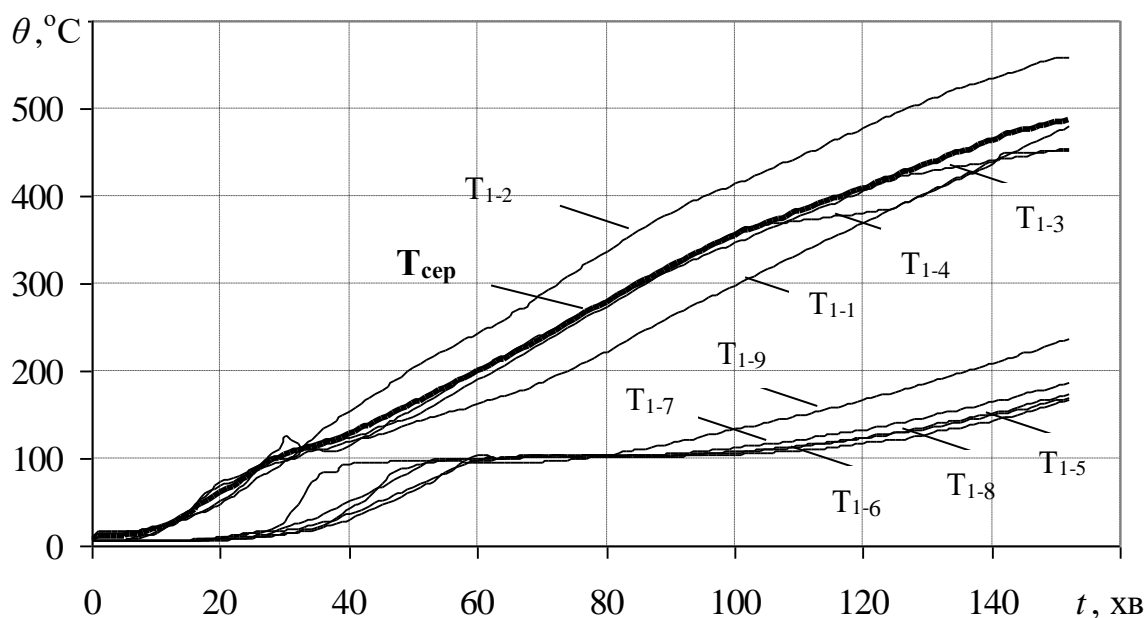


Рис. 4.23 Температура несучих арматурних стержнів (T_{1-1} – T_{1-4}), середня ($T_{сер}$) та по перерізу (T_{1-5} – T_{1-9}) зразка № 1 колони

Використовуючи результати випробувань на вогнестійкість (рис. 4.23), виконано чисельне моделювання прогріву залізобетонної колони в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» (ліцензія № 1/8583 від 16.02.2022). Алгоритм розробки комп'ютерної моделі залізобетонної колони являв собою систему рівнянь, розв'язання яких дозволило отримати значення температури у кожному вузлі координатної сітки, що накладають на переріз. Координатну

сітку накладено так, щоб її вузли були розташовані не тільки в товщині перерізу, але і по периметру, а також у центрі стрижнів для конструкцій з гнучкою арматурою, по довжині полиць і стінки в середині їхньої товщини для конструкцій з жорсткою арматурою. Для більш точних розрахунків розробниками програми крок сітки рекомендовано задавати в межах 0,01–0,03 м, але він обов'язково повинен бути більшим за максимальний діаметр робочої арматури.

Проведено моделювання поперечного перерізу залізобетонної колони в 15-ій ознаці схеми в програмному середовищі «ЛІРА-САПР» (рис. 4.24).

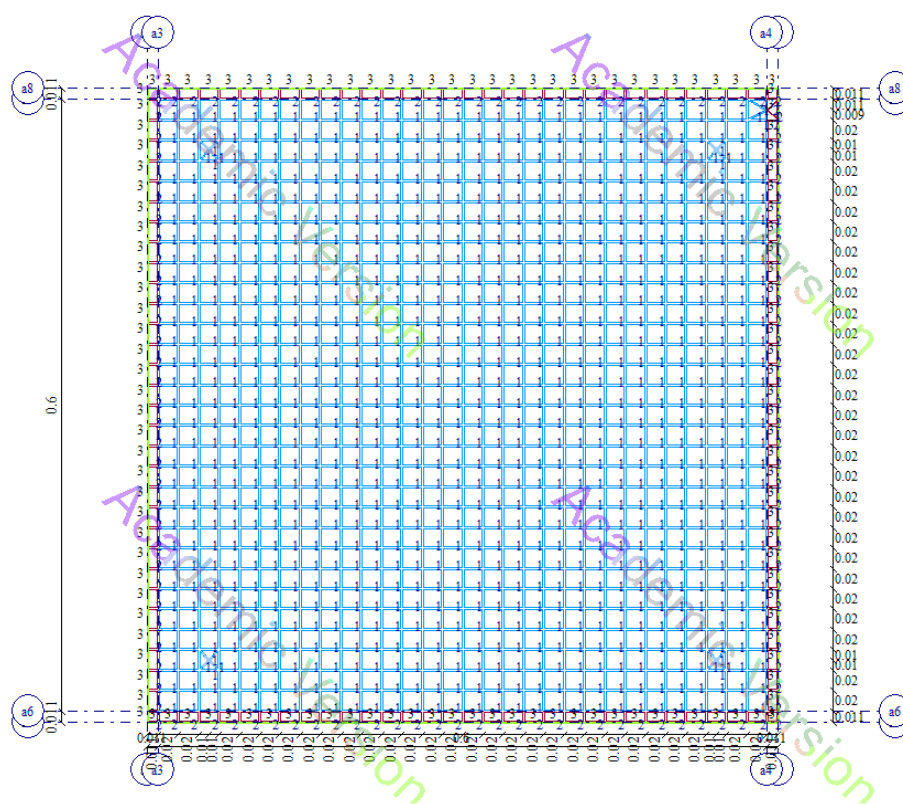


Рис. 4.24 Скінчено-елементна модель залізобетонної колони з типами елементів жорсткості

Побудована комп'ютерна модель в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» враховує радіаційно-конвективний теплообмін у газовому середовищі від джерела теплового впливу до поверхні конструкції та теплообмін теплопровідністю у залізобетонній колоні, а також проводити розрахунки із

застосуванням граничних умов третього роду і граничних умов складного радіаційно-конвективного теплообміну [253].

Під час моделювання нестационарного прогріву залізобетонної колони в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» використана модель колони (рис. 4.24), яка обігривається з чотирьох сторін за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі. Теплофізичні і механічні характеристики залізобетону та сталі задані залежними від температури. Коефіцієнт теплопровідності та питома об'ємна теплоємність бетону колони були знайдені розв'язанням обернених задач теплопровідності за результатами випробувань на вогнестійкість [257].

Коефіцієнти тепловіддачі і теплового випромінювання задані константами. Початкова температура конструкції 6 °С. Інші параметри для моделювання теплового стану залізобетонної колони задавалися згідно [258].

В результаті чисельного моделювання були отримані розподіли температур у залізобетонній колоні на 30, 60, 90 та 120 хвилинах вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі при обігріві колони з чотирьох сторін (рис. 4.25).

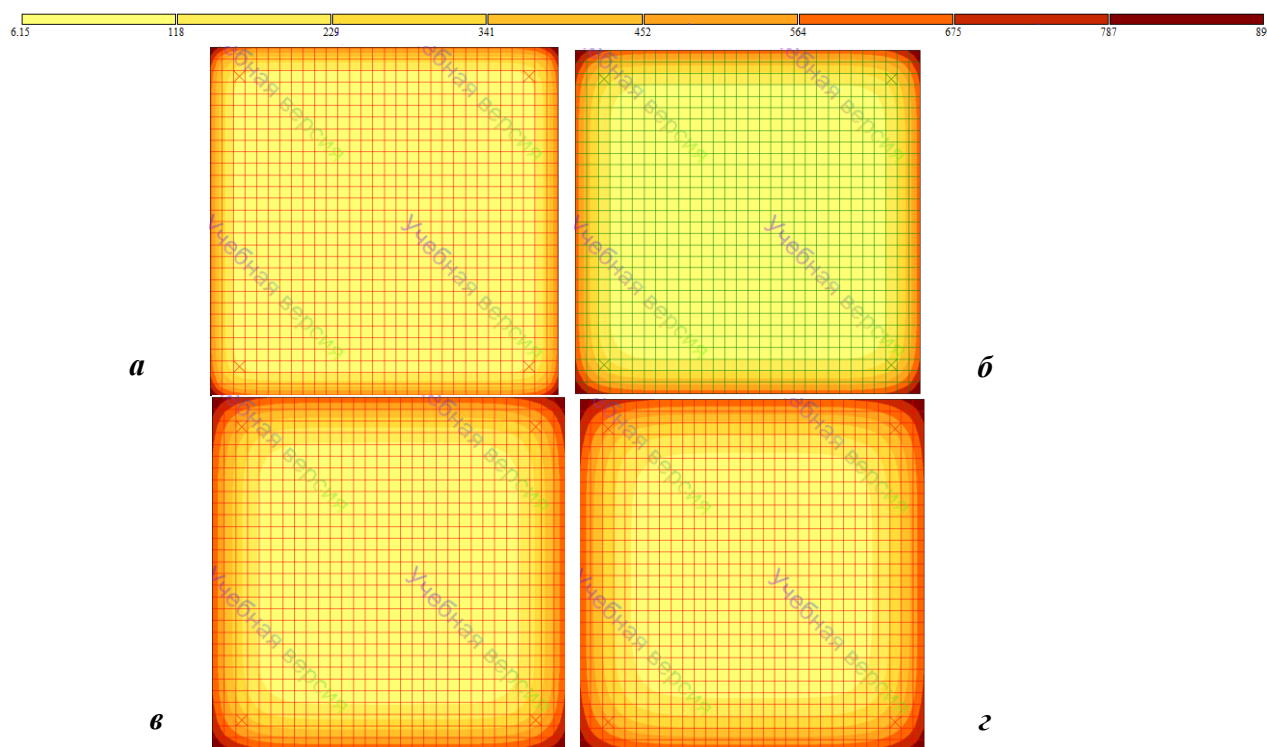


Рис. 4.25 Розподіл температур в залізобетонній колоні на 30 (а), 60 (б), 90 (в) та 120 (г) хвилинах випробування

На рис. 4.26 показано, що криві зміни середньої температури несучих арматурних стержнів експериментальних та розрахункових температур мають задовільну збіжність. Найбільше відхилення температури спостерігалось на 60 хвилині розрахунку і становило $13\text{ }^{\circ}\text{C}$, що відповідає похибці 7% . Це підтверджує правильність побудови комп'ютерної моделі в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» для оцінювання вогнестійкості залізобетонних колон та її використання при моделюванні прогріву залізобетонних конструкцій інших видів та при впливові зовнішніх факторів [259].

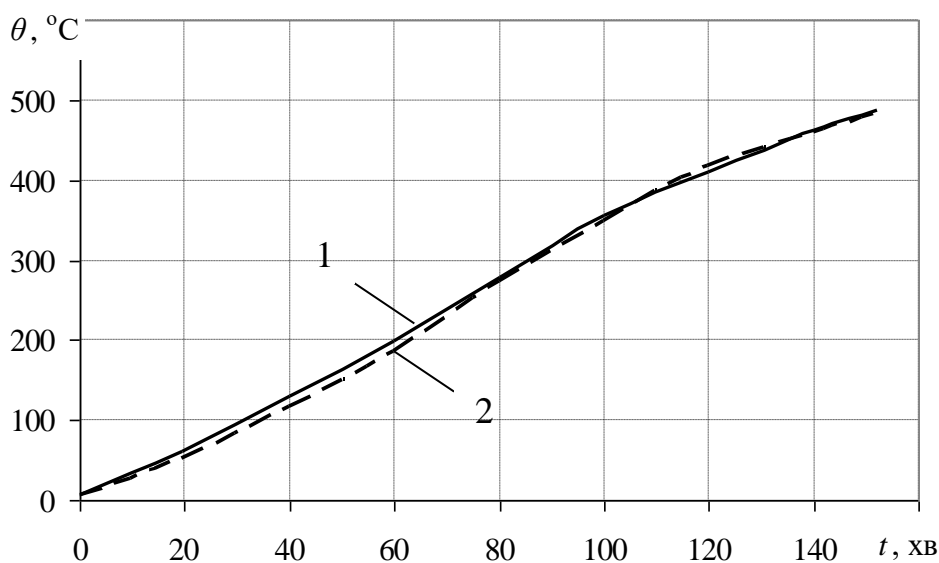


Рис. 4.26 Середня температура на несучих арматурних стержнях на 152 хвилині прогріву незахищеної залізобетонної колони: 1 – експериментальна крива; 2 – розрахункова крива

Як видно з рис. 4.26, крива 2 зміни температури на несучих арматурних стержнях від часу вогневого впливу задовільно корелює з експериментальною кривою 1 і за 152 хвилини прогріву за стандартним температурним режимом пожежі арматурні стержні колони прогрілися до 500°C . Дана модель в подальшому використовувалась для моделювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних колон при забезпеченні меж вогнестійкості більше 120 хвилин.

Використовуючи створену в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» модель (рис. 4.24) та теплофізичні характеристики досліджуваного пасивного вогнезахисного покриття для підвищення вогнестійкості залізобетонних конструкцій, було побудовано модель вогнезахисної залізобетонної колони (рис. 4.27).

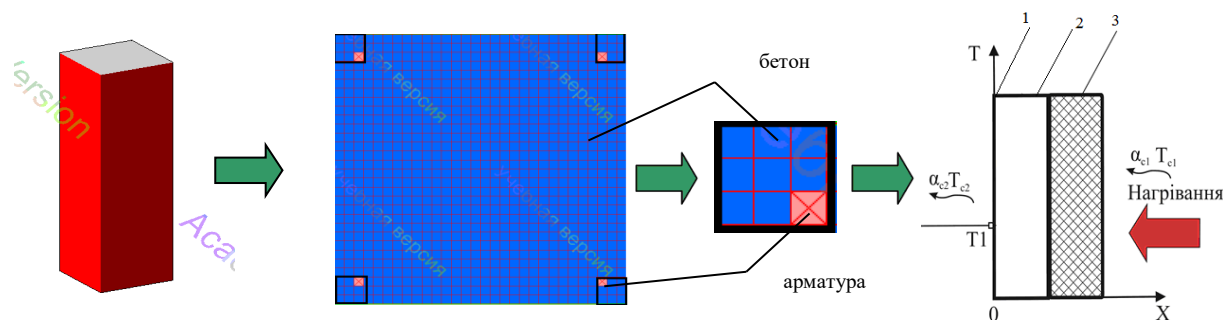


Рис. 4.27 Модель вогнезахисної залізобетонної колони: 1 – арматурний стержень; 2 – бетон; 3 – вогнезахисне покриття; T_1 – термопара, встановлена на арматурі

За допомогою розробленої моделі (рис. 4.27), використовуючи теплофізичні характеристики покриття, проведено моделювання вогнезахисту залізобетонної колони. В результаті проведених досліджень встановлено, що для підвищення межі вогнестійкості залізобетонної колони розмірами 600×600 мм до 180 хвилин необхідно запроектувати вогнезахист у вигляді пасивного вогнезахисного покриття [258]. Зокрема, товщина вогнезахисного покриття згідно з розрахунками, склала 11 мм на основі розв'язання прямих задач теплопровідності у програмному комплексі FRIEND [253].

На рис. 4.28 представлені результати моделювання нестационарного прогрівання вогнезахисної залізобетонної колони на 120 хвилині випробування з товщиною вогнезахисного покриття 11 мм.

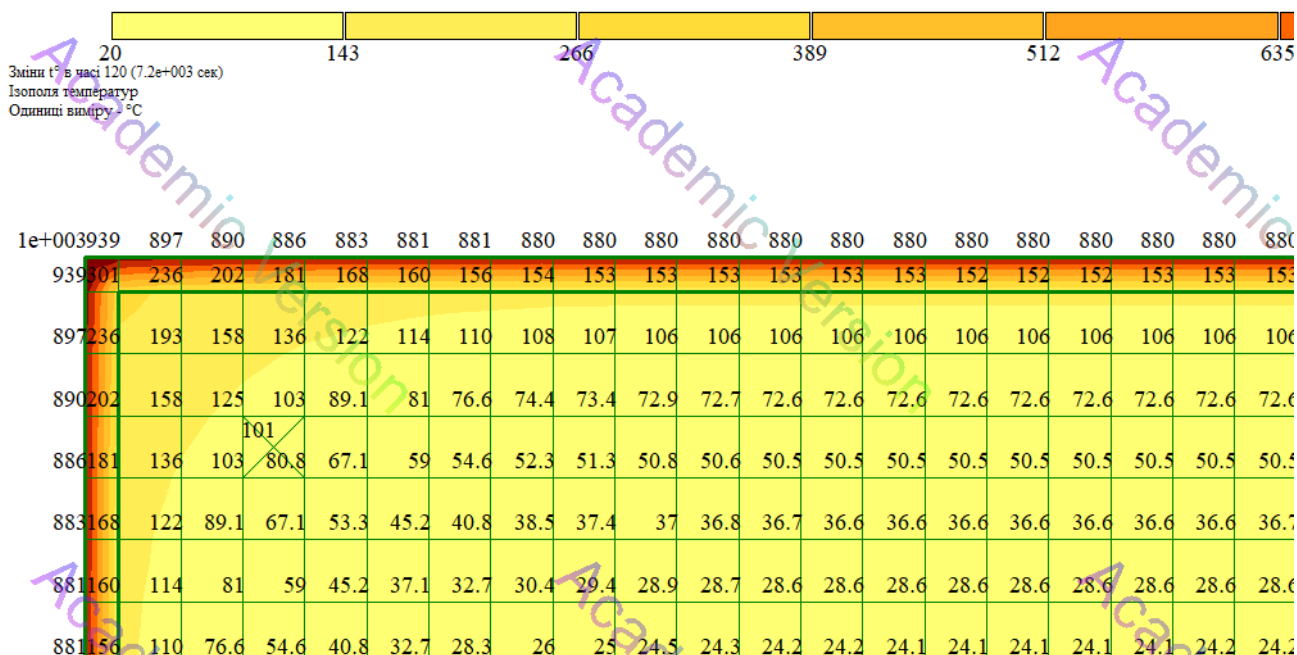


Рис. 4.28 Розподіл температур у вогнезахисній залізобетонній колоні на 120 хвилині випробування

Як видно із рис. 4.28, товщина пасивного вогнезахисного покриття 11 мм здатна знизити температуру прогрівання арматурних стержнів на 120 хвилині вогневого впливу в 4 рази. Ця обставина вказує на ефективність використання вогнезахисних залізобетонних конструкцій і дозволяє проектувати вогнезахист залізобетонних колон залежно від забезпечення нормованих меж вогнестійкості конструкцій.

Розроблений розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій було застосовано до зразків конструкцій, які було вилучено з конструкцій, для оцінювання вогнестійкості, оцінки їх технічного стану та в подальшому стан будівель та споруд з таких конструкцій. За мету ставилося прийняття рішення про можливу подальшу експлуатацію або про постановку будівлі на капітальний ремонт (реконструкцію) при спільній дії силових і високотемпературних впливів.

В результаті проведеної роботи було розроблено спосіб визначення межі вогнестійкості будівельної конструкції [260] та температури втрати несучої здатності будівельної конструкції [261], що полягає в визначенні часу втрати

несучої здатності будівельної конструкції який полягає в тому, що у випробовуваному матеріалі виконують отвір, нарізують в ньому різьбу, вгвинчують гвинт, гвинт виконують з матеріалу міцнішого, ніж випробуваний, фіксують навантаження від силозадавального пристрою, яке відповідає проектному навантаженню на будівельну конструкцію, здійснюють нагрівання досліджуваного зразка, доки не відбудеться зріз різьби, додатково задають режим нагрівання зразка, який відповідає стандартному температурному режиму пожежі, реєструють час від початку нагрівання досліджуваного зразка до зрізу різьби. За рахунок розробленого способу вдалося підвищити ефективність випробувань зразків будівельних конструкцій на вогнестійкість за рахунок зниження енерго-, праце- та матеріаловитрати, при цьому стає можливим встановити відповідність фактичної межі вогнестійкості будівельної конструкції нормативному значенню.

4.3 Апробація розробленого розрахунково-експериментального методу при оцінюванні вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій

Користуючись алгоритмом та процедурою реалізації розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій (рис. 4.1) проведено оцінювання вогнестійкості вогнезахищеної сталеві колони та сталеві навантаженої балки.

Для цього згідно «блоку випробування» випробували 2 сталеві колони двотаврового перерізу НЕВ 200 (приведена товщина 6,1 мм), висотою по 2 метри кожна. Колони оброблялись реактивною вогнезахисною речовиною італійської фірми після попереднього нанесення ґрунту. На кожному зразку колони розміщувалось три термомпари, як показано на рис. 4.29.

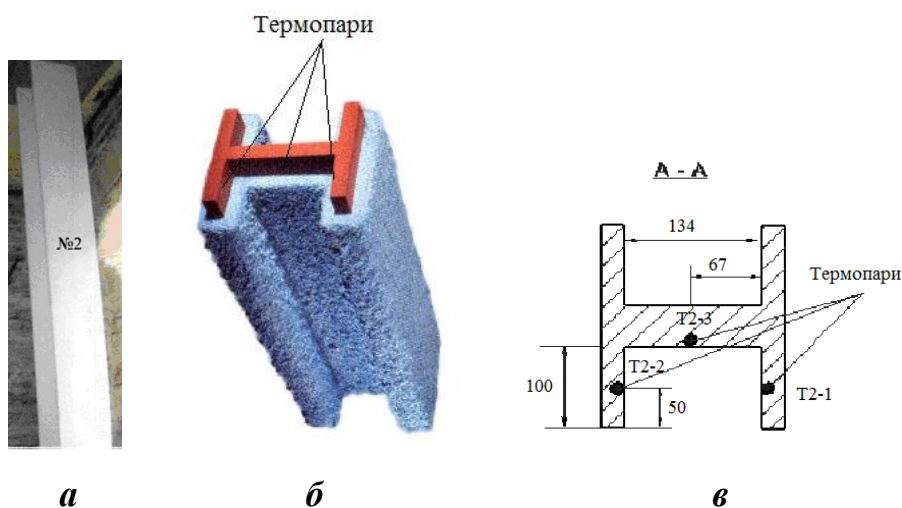


Рис. 4.29 Загальний вигляд вогнезахисної колони (а) та схема розташування термопар на колоні (б, в), які випробовуються без навантаження

Для випробувань використовувалась спеціальна випробувальна піч та метрологічні повірені засоби вимірювальної техніки.

Температурний режим в печі був відтворений згідно стандартного температурного режиму пожежі (рис. 4.30). Обігрів відбувався з чотирьох сторін колони.

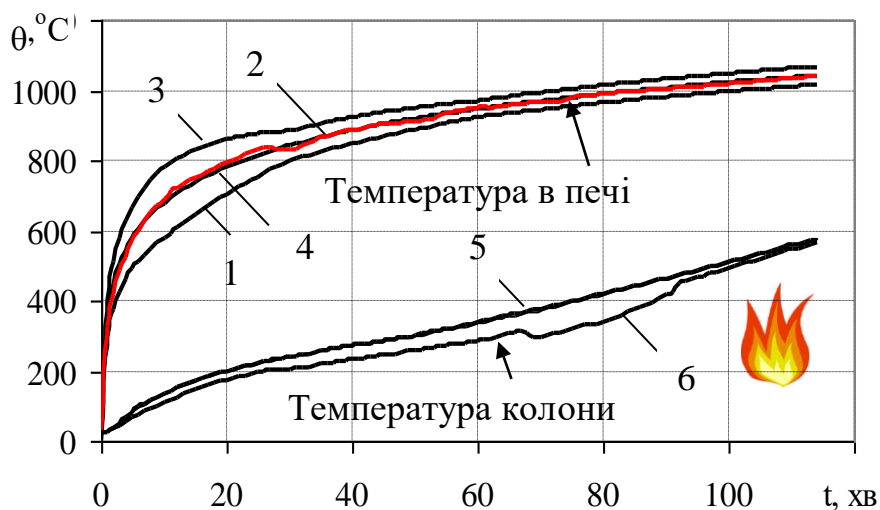


Рис. 4.30 Залежність температури в печі (криві 1–4) та середніх температур зразків вогнезахисних сталевих колон від тривалості вогневого впливу: 5 – зразок колони № 2; 6 – зразок колони № 1

Приведені на рис. 4.30 (криві 5,6) температурні залежності середніх температур зразків вогнезахищених сталевих колон від тривалості вогневого впливу порівнювались з результатами комп'ютерного моделювання нестационарного прогріву вогнезахищеної сталеві колони, виконані за допомогою програмного забезпечення «ЛІРА-САПР». Для порівняння результатів моделювання з експериментальним визначенням температур вогнезахищеної сталеві колони у визначених місцях (рис. 4.29 б, в) в умовах вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі брали значення температури зразка колони № 2 (рис. 4.30, крива 5), яка найбільше прогрілася в результаті випробування (консервативний підхід).

Було побудовано скінчено-елементну модель вогнезахищеної сталеві колони, призначено типи жорсткості, вибрано крок розбивки колони на елементи (рис. 4.31). Модель складалася з 42907 елементів. Крок розбиття по перерізу склав $h=0,01$ м, часовий крок $\Delta t=60$ с.

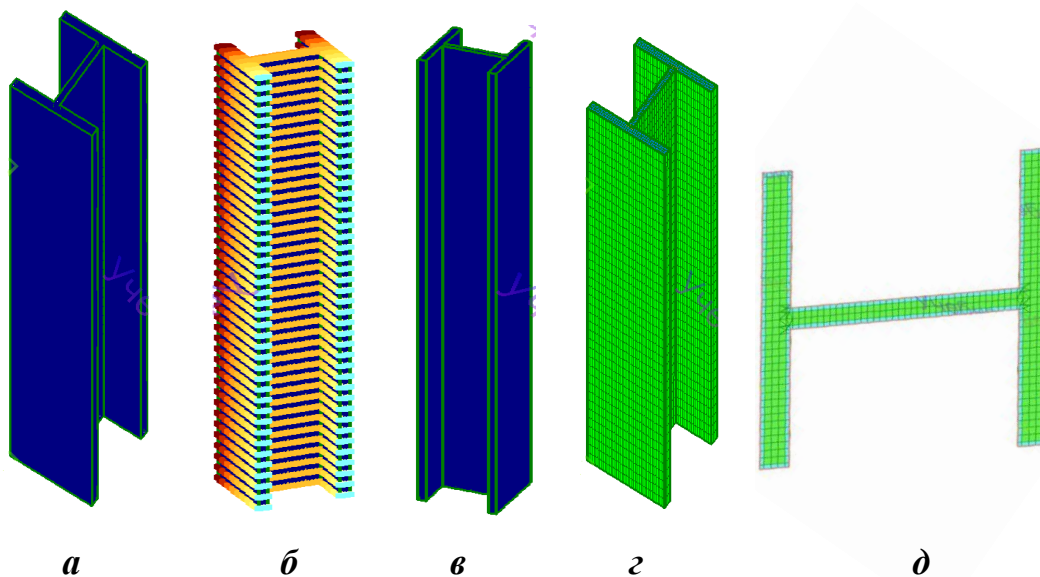


Рис. 4.31 Модель вогнезахищеної сталеві колони в 3D (а-г) і 1D (д) постановці

Алгоритм розрахунку полягав у визначенні температури у кожному вузлі перерізу розробленої розрахункової моделі. Координатна сітка накладалася так, щоб її вузли розташовувалися не тільки в товщині перерізу, але і по його

периметру. Для цього задавали теплофізичні характеристики сталі, представлені в Єврокоді 3.

Теплофізичні характеристики досліджуваного реактивного вогнезахисного покриття для їх використання в розрахунках нестационарного прогріву вогнезахисної сталевій колони були визначені в попередніх роботах [240].

Геометричні розміри вогнезахисної колони для моделювання її теплового стану зображено на рис. 4.32.

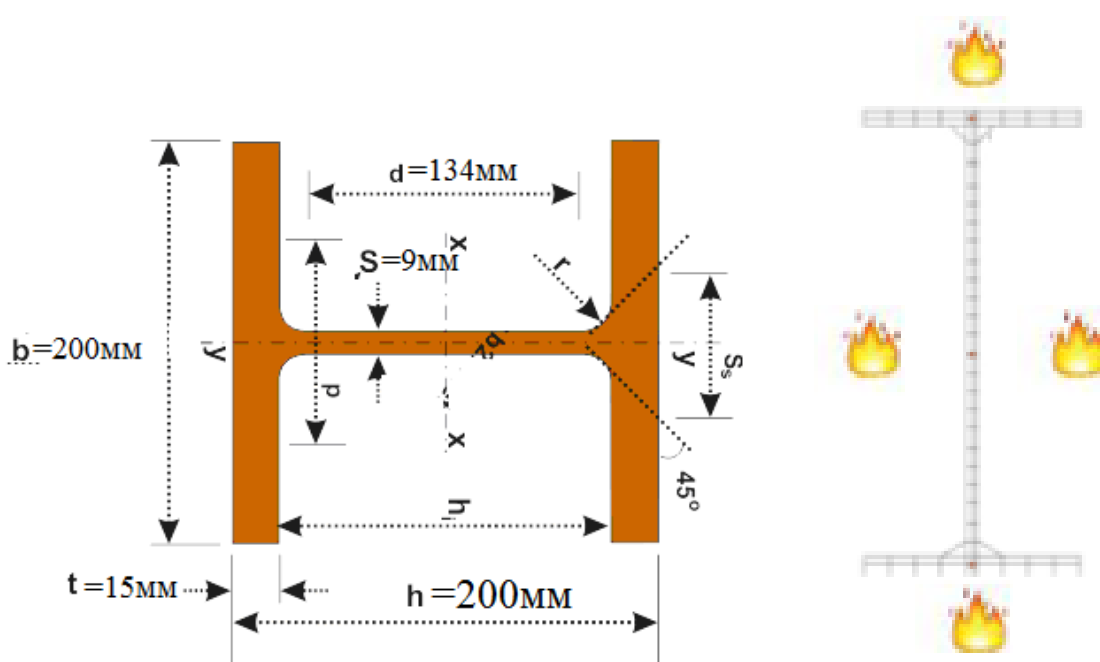


Рис. 4.32 Геометричні розміри сталевій колони для моделювання

В результаті чисельного моделювання були отримані розподіли температур у вогнезахисній сталевій колоні протягом випробування в умовах вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі (рис. 4.33).

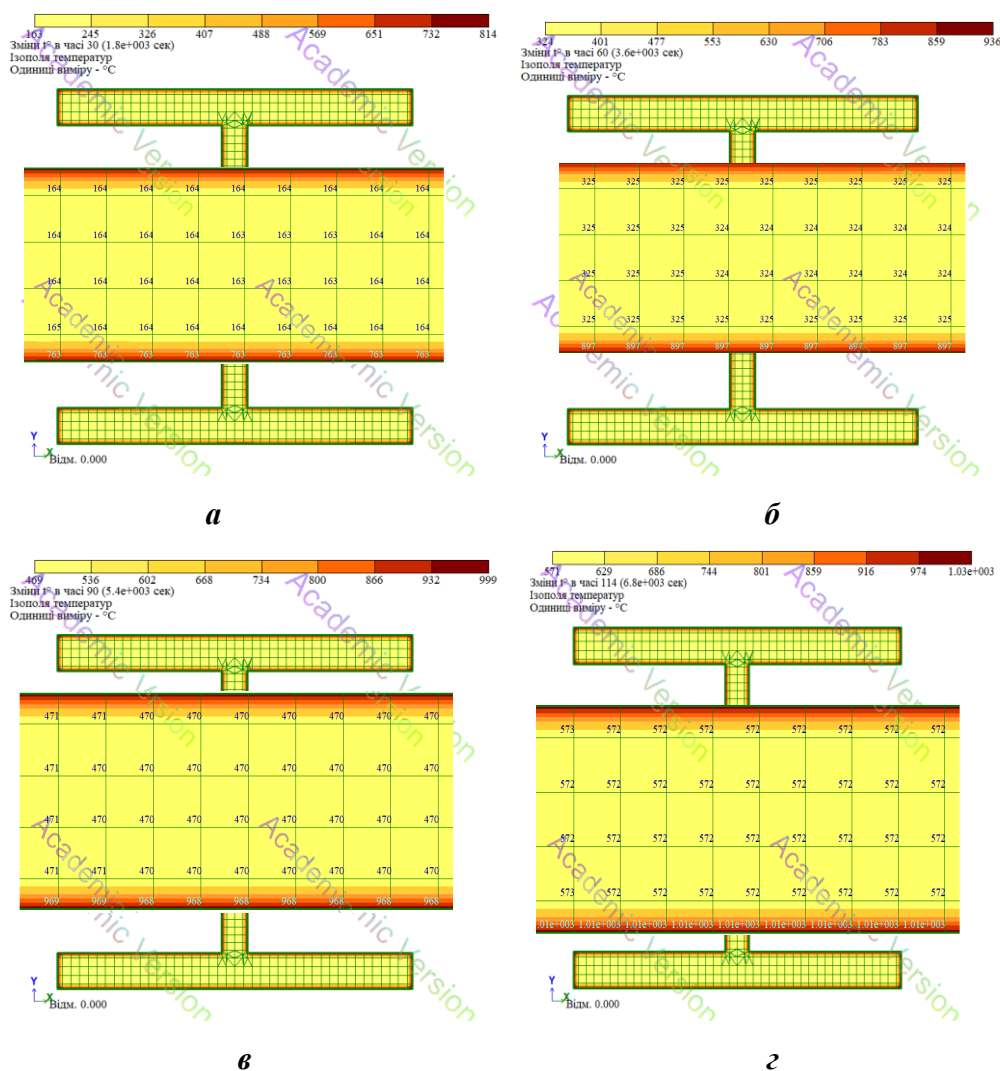


Рис. 4.33 Розподіл температур у вогнезахисній сталевій колоні на 30 (*a*), 60 (*б*), 90 (*в*) та 114 (*г*) хвилині випробування

Розроблена модель в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» враховує радіаційно-конвективний теплообмін у газовому середовищі від джерела теплового впливу до поверхні вогнезахисної сталевій колоні та теплообмін теплопровідністю у вогнезахисній колоні [262], також враховує зміну температурного режиму в печі [263].

Інші параметри для моделювання теплового стану вогнезахисної сталевій колоні задавалися згідно [243]. В результаті чисельного моделювання розв'язанням прямих задач теплопровідності були отримані розрахункові значення прогріву вогнезахисної сталевій колоні, які зображено на рис. 4.34 та в табл. 4.4.

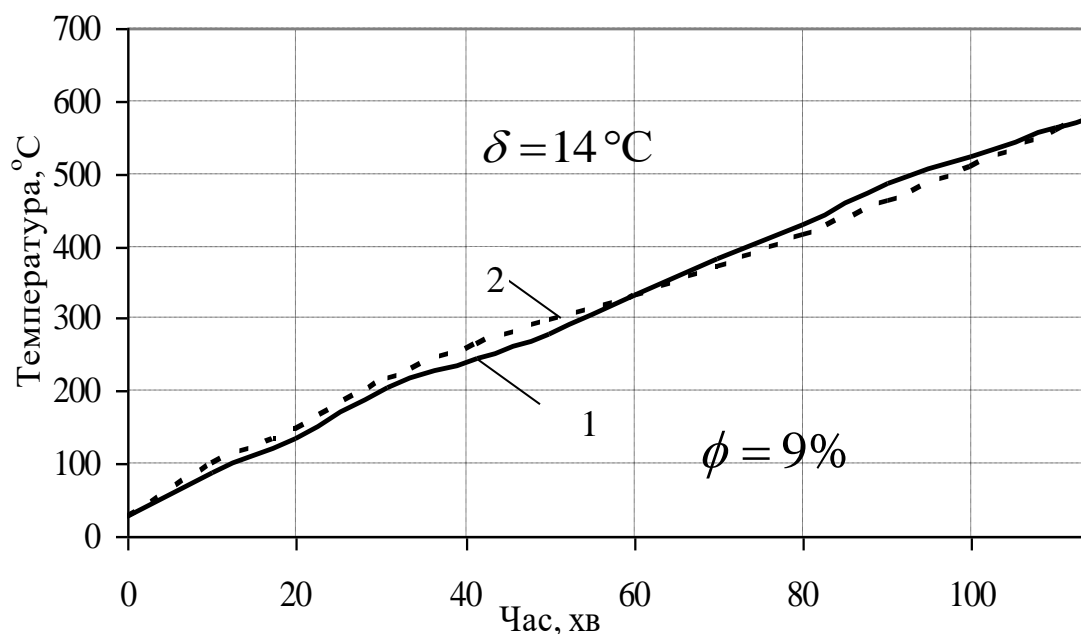


Рис. 4.34 Залежність температури на полках вогнезахисної сталеві колони від часу вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі: 1 – експериментальна крива; 2 – розрахункова крива

Таблиця 4.4

Порівняння експериментальних та чисельних результатів

Час, хв.	Тсер., °C (експеримент)	ЛІРА-САПР, °C (розрахунок)	Відхилення, °C	Похибка, %
0	28	26,1	1,9	6,8
10	72	68	4	5,6
20	207	193	14	9
30	242	228	15	5,8
40	272	262	10	3,7
50	297	287	10	3,4
60	333	331	2	0,6
70	371	382	11	3
80	415	430	15	3,5
90	471	484	13	2,7
100	509	522	13	2,5
110	559	563	4	0,8
114	578	576	2	0,4

Виходячи з результатів, зображених на рис. 4.34 та табл. 4.4, можна констатувати правильність побудови моделі в програмному середовищі «ЛПРА-САПР», правильність задавання параметрів, початкових та граничних умов. Для доведення цього твердження достатньо дослідити характер кривих зміни температури на полках вогнезахищеної сталевій колони від часу вогневого впливу (рис. 4.34). Це не розходиться з експериментальними даними (рис. 4.34, крива 1), так як розрахункова крива (рис. 4.34, крива 2) зміни температури від часу вогневого впливу на полках вогнезахищеної сталевій колони добре корелює з експериментальною. Максимальна допустима область відхилення при цьому складає 9 %. Це в свою чергу говорить про задовільну адекватність розробленої скінчено-елементної моделі для теплотехнічного розрахунку теплового стану вогнезахищеної сталевій колони.

Для оцінки ефективності розробленого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій були проведені випробування на вогнестійкість 2 сталевих балок двотаврового перерізу ІРЕ 400 (зведена товщина 5,309 мм, коефіцієнт перерізу $A_m/V=188,4 \text{ м}^{-1}$), довжиною по 4,7 м, які перед нанесенням вогнезахисної речовини були покриті шаром ґрунту ГФ-021 товщиною 0,05 мм. Товщина покриття для зразка балки № 14 складала 0,215 мм, для зразка балки № 15 – 1,173 мм. Навантаження на балку здійснено 2 блоками по 730 кг та 264 кг по всій балці (рис. 4.35).



Рис. 4.35 Вигляд зразків навантаженої вогнезахищеної сталевій балки (№ 14) в печі до (а) та після (б) проведення випробувань з мінімальним значенням товщини вогнезахисного покриття

На рис. 4.36 зображено вигляд зверху горизонтальної печі під час випробувань (навантаження на довгі балки) (а) та прогин довгої балки після випробувань на вогнестійкість (б)



а

б

Рис. 4.36 Вигляд зверху горизонтальної печі під час випробувань (навантаження на довгі балки) (а) та прогин довгої балки після випробувань на вогнестійкість (б)

Розташування термопар на зразках здійснювалось згідно з ДСТУ Б В.1.1-13: 2007. Експерименти проводили при температурі повітря 27 °С, відносній вологості повітря 54 %. Температурний режим пожежі показано на рис. 4.37.

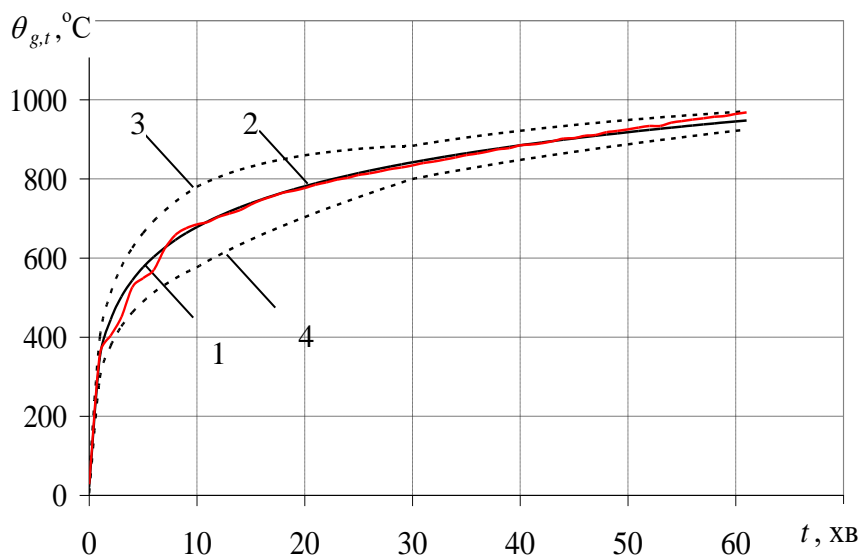


Рис. 4.37 Залежність температури в печі від тривалості вогневого впливу при проведенні випробування балки №14 з мінімальною товщиною вогнезахисного покриття (0,215 мм): 1 – крива стандартного температурного режиму; крива 2 – реальна крива зміни температури в печі; 3 – допустимі при випробуваннях максимальні значення температури в печі; 4 – допустимі при випробуваннях мінімальні значення температури в печі.

На рис. 4.38 представлені середні температури довгих навантажених вогнезахисних сталевих балок мінімальної та максимальної товщини від часу вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі: 1 – зразок балки № 14; 2 – зразок балки № 15.

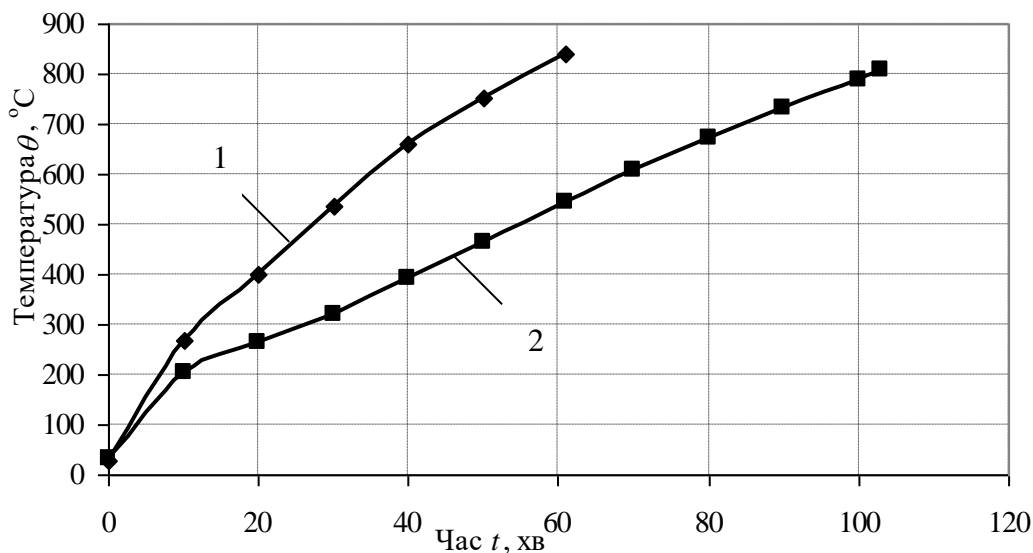


Рис. 4.38 Залежність середніх температур зразків довгих навантажених сталевих балок з реактивним вогнезахисним покриттям мінімальної та максимальної товщини від часу вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі: 1 – зразок балки № 14; 2 – зразок балки № 15

Було побудовано комп'ютерну модель напружено-деформованого стану вогнезахисної сталевий балки вогнезахисної сталевий балки, призначено типи жорсткості, вибрано крок розбивки балки на елементи (рис. 4.39). Модель складається з 58231 та 41732 елементів. Крок розбиття по перерізу склав $h=0,01$ м, часовий крок $\Delta t=60$ с.

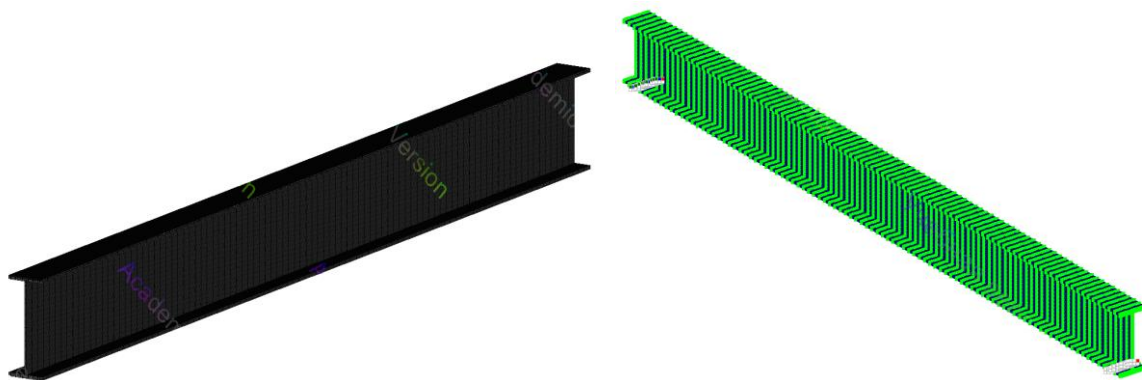


Рис. 4.39 Комп'ютерна модель напружено-деформованого стану вогнезахисної сталеві балки

На рис. 4.40 зображена розрахункова схема навантаженої вогнезахисної сталеві балки при розрахунку напружено-деформованого стану балки.

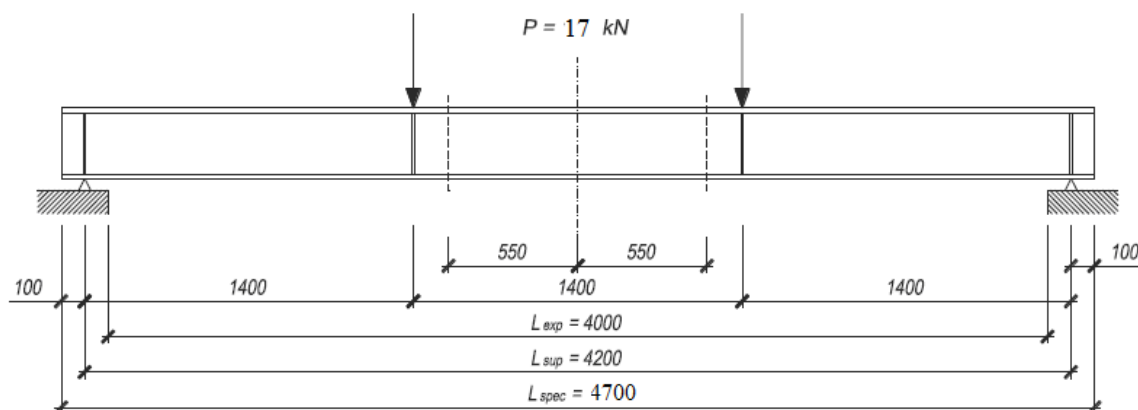


Рис. 4.40 Загальний вигляд розрахункової схеми

Для розв'язання задач був обраний продукт «ЛПРА-САПР», за допомогою якої визначали розподіл температурних полів розв'язанням теплотехнічної задачі. Статичний розрахунок виконувався із залученням відомих методик, що враховують вид завантаження конструкції.

Для розрахунку моделі в програмі використовувався метод скінчених елементів, де створювалася твердотільна об'ємна (кінцевими елементами) геометрія, яка в подальшому розбивалася на скінчені елементи у вигляді сітки. Сітка мала вузли, в кожному з яких у часі розраховувалася температура. Внаслідок цих розрахунків будувалися графіки розрахункових залежностей.

Розрахункова схема розглянутої задачі представлена на рис. 4.41.

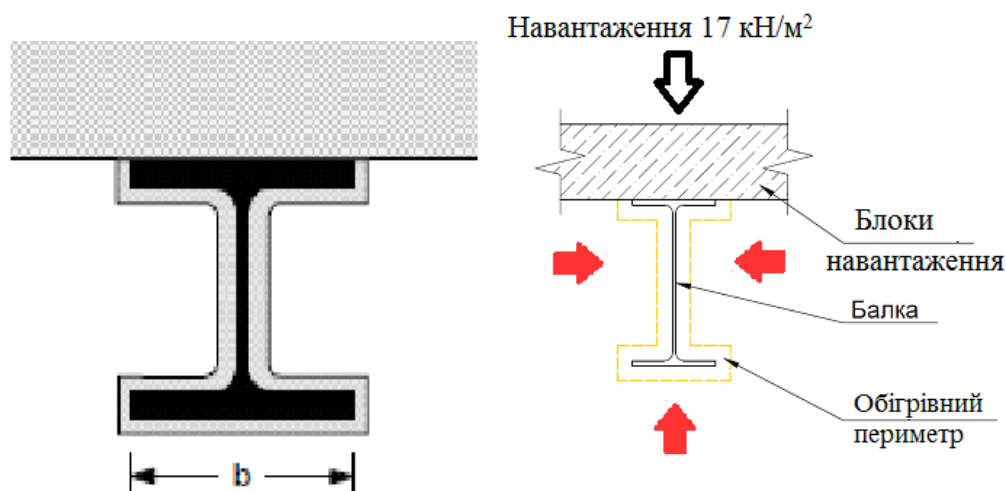


Рис. 4.41 Розрахункова схема вогнезахисної балки

Результатом моделювання прогріву балки в умовах обігріву її газовим середовищем в умовах випробування при стандартному температурному режимові пожежі є ізополі розподілу температур по перетину балки (рис. 4.42).

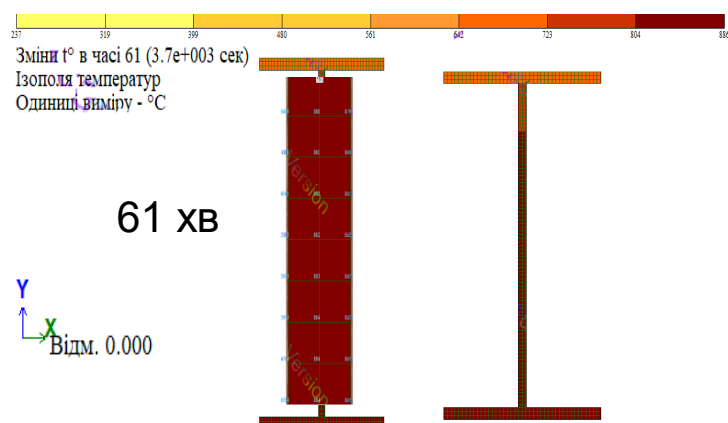


Рис. 4.42 Розподіл температур в вогнезахисній сталевій балці з *мінімальною* товщиною вогнезахисного покриття на 61 хвилині випробування

На підставі отриманих ізополей розподілу температур (рис. 4.42) по перерізу елемента зроблено висновок, що верхня і нижня полки двотавра, а

також стінка двотавра, досягають критичних температур практично одночасно, що тягне за собою швидке руйнування конструкції, в силу втрати стійкості балкою.

За результатами проведених розрахунків температури сталі для часу $t_{fi,requ}=60$ хв за різних товщин покриття визначено, що значення мінімальної товщини d_{Pmin} вогнезахисного покриття, за якого для сталеві балки з коефіцієнтом перерізу $A_p/V = 188,4 \text{ м}^{-1}$ забезпечується нормована вогнестійкість R 60, становить 0,215 мм.

Наступним етапом було моделювання напружено-деформованого стану вогнезахищеної сталеві балки. Для цього в програмному комплексі «ЛПРА-САПР» була побудована модель та прикладені навантаження і власна вага балки.

При моделюванні напружено-деформованого стану навантаженої вогнезахищеної сталеві балки використано діаграму «напруження – деформація» (рис. 4.43, а) та коефіцієнту зниження (рис. 4.43, б) для вуглецевої сталі за підвищеної температури.

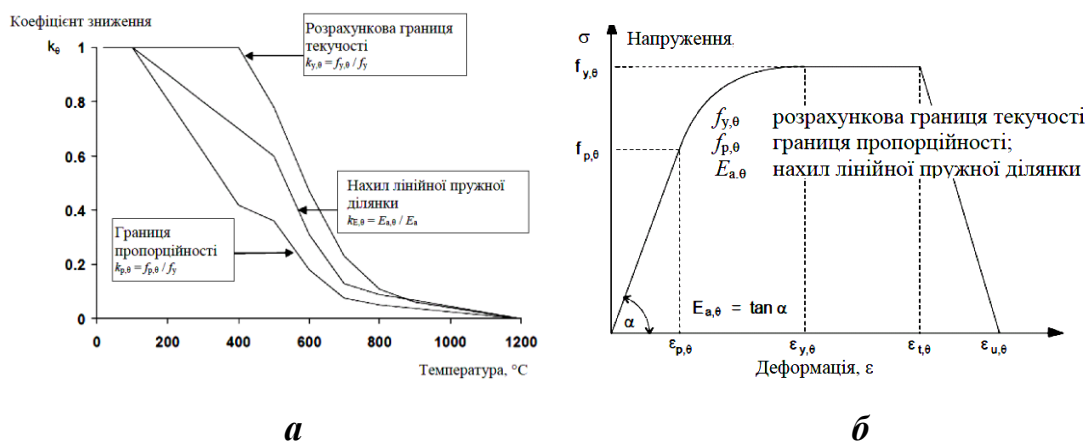


Рис. 4.43 Діаграма «напруження – деформація» (а) та коефіцієнта зниження (б) для вуглецевої сталі за підвищеної температури

На рис. 4.44 зображено результати статичного розрахунку в «ЛПРІ-САПР».

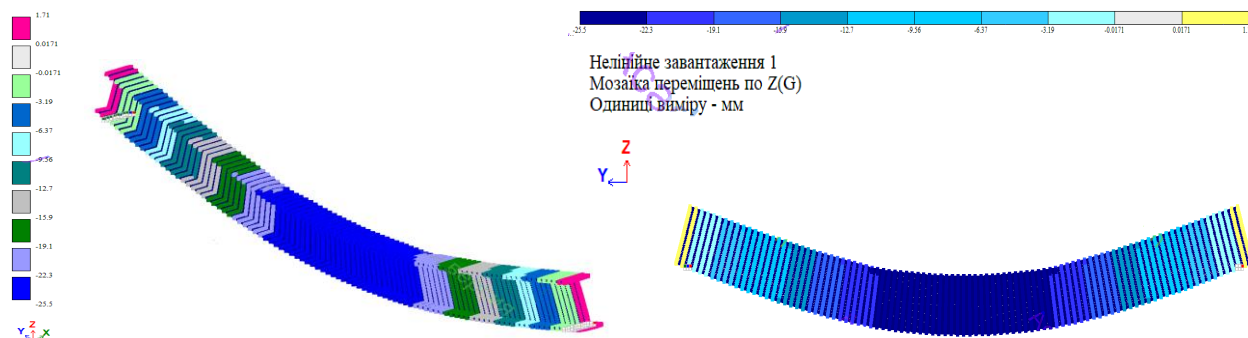


Рис. 4.44 Прогини навантаженої вогнезахищеної сталеві балки

Як видно із рис. 4.44 прогин навантаженої вогнезахищеної сталеві балки в середній частині плити в кінці розрахунку складає 25,5 мм, що задовільно корелює з експериментальними результатами (25 мм), а похибка не перевищує 3% (рис. 4.45).

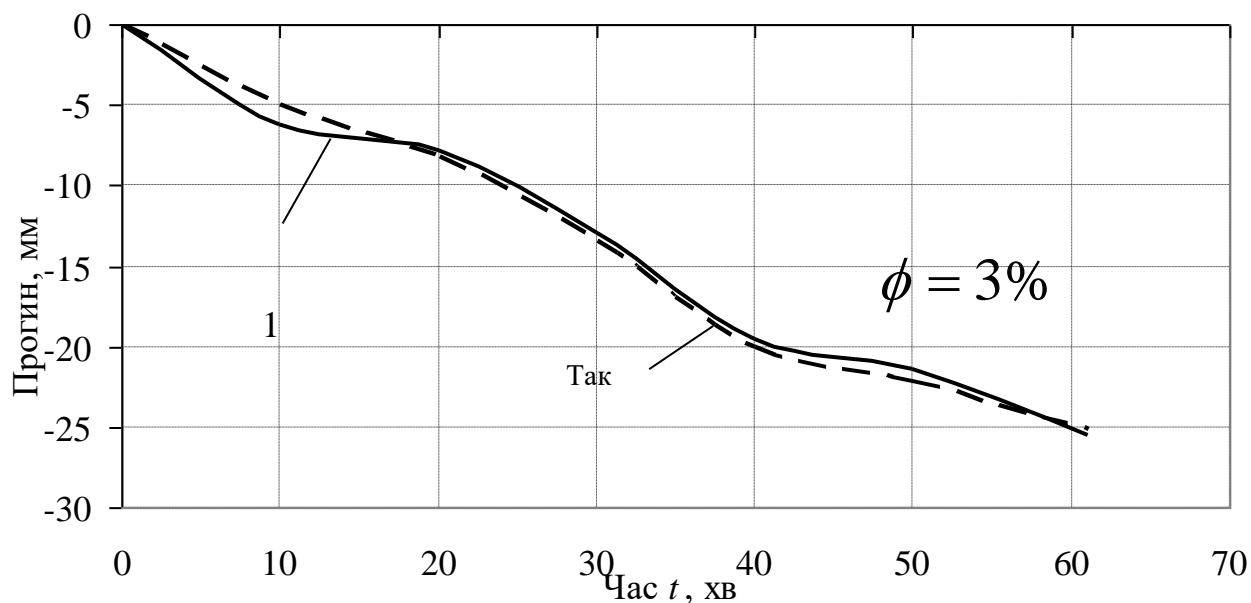


Рис. 4.45 Прогин навантаженої вогнезахищеної сталеві балки по середині прольоту в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі: 1 – експеримент; 2 – розрахунок в програмному комплексі «ЛПРА-САПР»

Виходячи з результатів, зображених на рис. 4.45, можна констатувати правильність побудови комп'ютерної моделі в програмному середовищі «ЛІРА-САПР». Правильність цього твердження доводить криві зміни значень прогину навантаженої вогнезахисної сталеві балки по середині прольоту від часу вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі (рис. 4.45).

Як зображено на рис. 4.45 найбільша область відхилення у значеннях прогину спостерігається на 50 хвилині розрахунку і становить близько 1,7 мм, що складає 3 %. Це означає, що врахування всіх параметрів при побудові комп'ютерної моделі теплових процесів та напружено-деформованого стану в системі «навантажена сталеві балка – вогнезахисне покриття» відкриває можливість для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій з прикладенням навантаження в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму пожежі.

На рис. 4.46 показано епюри переміщень по вісі X і Y.

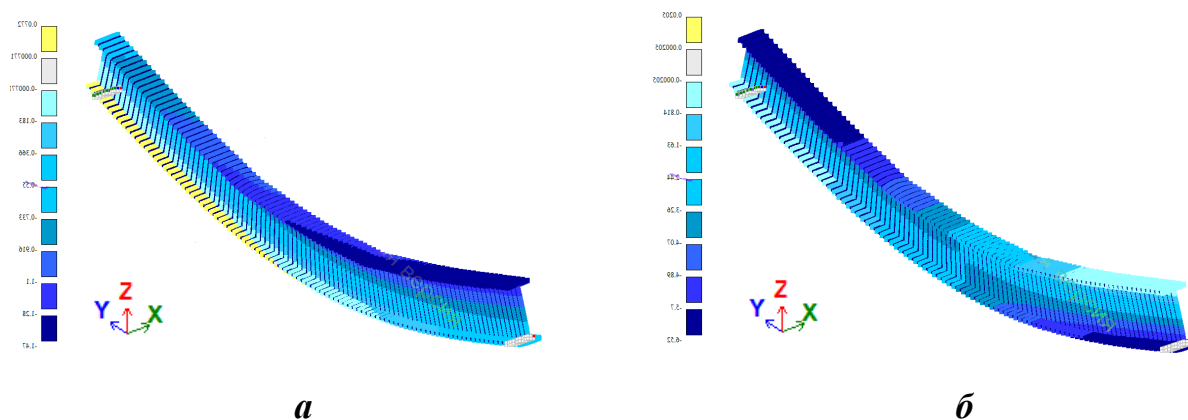


Рис. 4.46 Епюри переміщень сталеві балки по вісі X (а) і Y (б)

Таким чином, систематизовано та узагальнено можливості роботи комп'ютерної програми «ЛІРА-САПР» в області розрахунку та моделювання теплового та напружено-деформованого стану для оцінки вогнестійкості вогнезахисних сталевих будівельних конструкцій як з прикладеним навантаженням, так і без навантаження. Обґрунтована можливість проведення оцінки вогнестійкості за допомогою програми «ЛІРА-САПР», доведена

можливість впровадження даної програми при проєктуванні та введені в експлуатацію будівель та споруд [264]. Компютерне моделювання процесу нестационарного прогріву вогнезахисних будівельних конструкцій дає досить точні результати і може бути використане для ефективного оцінювання вогнестійкості вогнезахисних будівельних конструкцій, виготовлених із залізобетону і сталі. Похибки, які мають місце при моделюванні, можливо врахувати коефіцієнтом безпеки (запасу) під час оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій розробленим розрахунково-експериментальним методом.

Таким чином, розроблено методологію оцінювання вогнестійкості вогнезахисних будівельних конструкцій. Вона включає в себе:

- вибір математичної моделі: вхідні (початкові) дані, початкові умови, граничні умови, зв'язуюче рівняння, вихідні дані, розв'язання обернених задач теплопровідності, алгоритм, ідентифікація, збіжність результатів (аналіз невизначеностей), верифікація, валідація, аналіз чутливості, обчислювальний експеримент;

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

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

– моделювання процесу (теплотехнічний та статичний розрахунки);

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

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

Висновки до розділу 4

1. Розроблена структурно-логічна схема забезпечення вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій на основі розроблених математичної моделі та розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. Експериментальна частина методу передбачає проведення серії випробувань на вогнестійкість при заданих режимах пожежі. Розрахункова частина містить наступні обов'язкові процедури: побудову розрахункової моделі фізичного процесу (комп'ютерна, скінчено-елементна моделі); ідентифікацію за даними випробувань на вогнестійкість теплофізичних характеристик моделі на основі розв'язання обернених задач теплопровідності; визначення характеристик вогнезахисної здатності покриттів за результатами випробувань на вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій при різних умовах випробувань, розрахунок напружено-деформованого стану конструкції.

2. Розроблено скінчено-елементну модель теплового стану вогнезахисного багатопустотного залізобетонного перекриття в програмному

середовищі «ЛІРА-САПР». Особливістю розробленої моделі є правильне задавання теплообміну в порожнинах багатопустотного залізобетонного перекриття, що полягає в задаванні еквівалентного коефіцієнта теплопровідності шару перекриття з порожнинами (3,18 Вт/м·°С). При цьому значенні спостерігається найбільша близькість розрахункових і експериментальних температур з необігрівної поверхні вогнезахищеного залізобетонного перекриття. Проведено оцінку точності розробленої моделі оцінювання вогнестійкості вогнезахищеного багатопустотного залізобетонного перекриття. В результаті встановлено задовільну збіжність експериментальних та розрахункових температур (з точністю до 5 %). Встановлено, що найбільше відхилення температури від експериментальних значень спостерігалось на 160–180 хвилинах теплового розрахунку і становило 3 °С, що відповідає похибці не більше 5 %.

3. Розроблено комп'ютерну модель напружено-деформованого стану вогнезахищеного багатопустотного залізобетонного перекриття в програмному комплексі «ЛІРА-САПР». Проведено оцінку точності розробленої комп'ютерної моделі для оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій. Встановлено, що найбільша область відхилення у значеннях прогину спостерігається на 200 хвилині розрахунку і становить близько 3 мм, що складає 5 %.

4. Розроблено скінчено-елементну модель вогнезахищеної реактивним вогнезахисним покриттям сталевій колони двотаврового перерізу в програмному комплексі «ЛІРА-САПР». В результаті встановлено задовільну збіжність експериментальних та розрахункових температур з точністю 9 %. При цьому найбільше відхилення температури від експериментальних значень спостерігалось на 30 хвилині розрахунку і становило 14 °С, що відповідає похибці не більше 9 %.

5. Розроблено комп'ютерну модель для розрахунку меж вогнестійкості навантаженої вогнезахищеної сталевій балки. При цьому встановлено, що найбільша область відхилення у значеннях прогину під час теплового та

силового впливу на вогнезахищену сталеву балку спостерігається на 50 хвилині розрахунку і становить близько 1,7 мм, що складає 3 %.

РОЗДІЛ 5

ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНОГО РОЗРАХУНКОВО- ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

В розділі розроблено математичну модель будівлі шляхом створення скінчено-елементних моделей вогнезахищених конструкцій за допомогою сучасних програмних комплексів, що дозволяє оцінити рівень пожежної безпеки об'єкту в частині забезпечення вогнестійкості та прийняти ефективні рішення в частині підвищення вогнестійкості конструкцій.

5.1 Процедура реалізації розробленого розрахунково-експериментального методу при оцінюванні вогнестійкості конструктивної системи будівлі

Метою розрахунків є розкриття особливостей впливу високих температур та механічного навантаження на стійкість конструктивної системи будівлі (на прикладі паркінгу для автомобілів) із незахищених і вогнезахищених залізобетонних конструкцій (колон) за допомогою розробленої комп'ютерної моделі в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» (Україна). Це дає можливість здійснити аналіз теплового та напружено-деформованого стану незахищених будівельних конструкцій паркінгу та розробити пропозиції з підвищення меж вогнестійкості конструкцій за допомогою вогнезахисних покриттів з обґрунтованими параметрами та умовами експлуатації.

Процедура реалізації методу включає:

– побудува скінчено-елементної моделі напружено-деформованого стану будівлі паркінгу для автомобілів із залізобетонних конструкцій та скінчено-елементної моделі елемента конструкції (колони) для визначення теплового навантаження;

- аналіз варіантів пожеж для дослідження вогнестійкості (стійкості) будівлі в залежності від місця виникнення та пожежного навантаження на вогнезахищені залізобетонні конструкції будівлі паркінгу;
- виявлення найбільш уразливих конструкцій, виключення яких із конструктивної схеми призведе до найбільших збитків при пожежі та в подальшому до втрати стійкості будівлі в цілому;
- оцінювання вогнестійкості вогнезахищених будівельних конструкцій за допомогою розробленої моделі:
 - визначення розподілу температур по перерізу будівельної конструкції;
 - перевірка несучої здатності будівельних конструкцій моделі (напружено-деформований стан із зміненими жорсткісними характеристиками від впливу на конструкцію підвищених температур пожежі);
 - заходи з підвищення меж вогнестійкості конструкцій за допомогою вогнезахисних покриттів з науково обґрунтованими параметрами;
 - порівняння стійкості будівлі паркінгу до впливу високих температур пожежі з використанням вогнезахисних покриттів для підвищення меж вогнестійкості залізобетонних конструкцій і без використання.

5.2 Побудова скінчено-елементної моделі конструктивної системи будівлі

Результати розрахунків теплового та напружено-деформованого станів вогнезахищених залізобетонних (перекриттів, колон) та сталевих (колон, балок) будівельних конструкцій отриманих в розділі 4 використано при оцінюванні вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій на прикладі паркінгу із вогнезахищених конструкцій. Для цього було обрано 3-ох поверховий паркінг, що являє собою монолітно-каркасну будівлю, виконану із монолітного залізобетону. Схема будівлі являє собою повний звязковий каркас, загальною місткістю на 124 паркомісць під легкові автомобілі (з них на 1-му поверсі 56), схема 1-го поверху якого зображена на рис. 5.1.

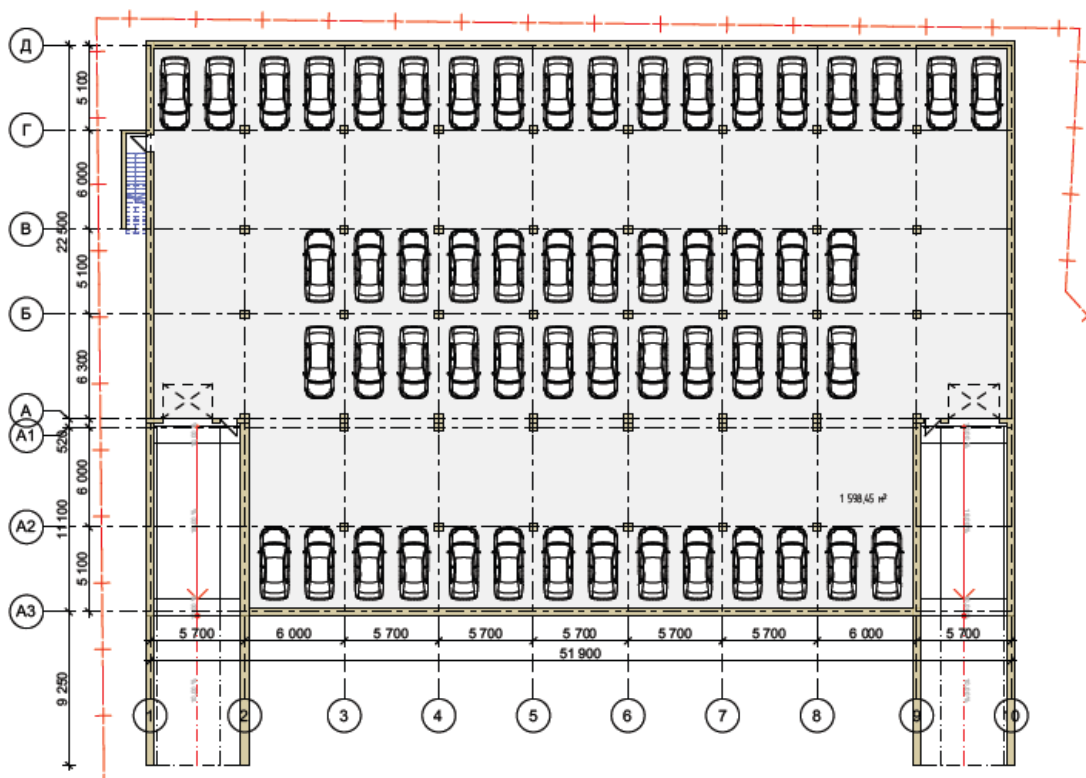


Рис. 5.1 Схема плану 1-го поверху паркінгу (масштаб 1:200)

Для вказаного проекту в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» було побудовано модель паркінгу, зображеного на рис. 5.2.

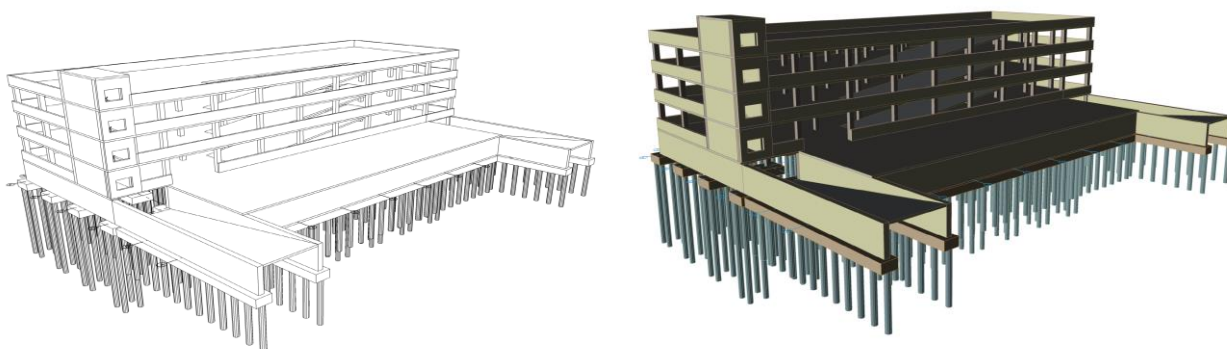


Рис. 5.2 Загальний вигляд трьохповерхового паркінгу, побудованого в програмному комплексі «ЛІРА-САПР»

На рис. 5.2 показано створену в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» скінчено-елементну модель трьохповерхового паркінгу, задані навантаження на

конструкції паркінгу. Модель складається з 49105 елементів та 40070 вузлів. Навантаження на плиту прийняті: постійне – $0,55 \text{ т/м}^2$, тимчасове – $0,96 \text{ т/м}^2$, із них довготривале – $0,6 \text{ т/м}^2$, короткочасне $0,36 \text{ т/м}^2$.

5.3 Дослідження вогнестійкості будівельних конструкцій конструктивної системи будівлі (колон)

Змодельованим елементам скінчено-елементної моделі було призначено типи жорсткості, як зображено на рис. 5.3 та надані їх характеристики (табл. 5.1–5.4).

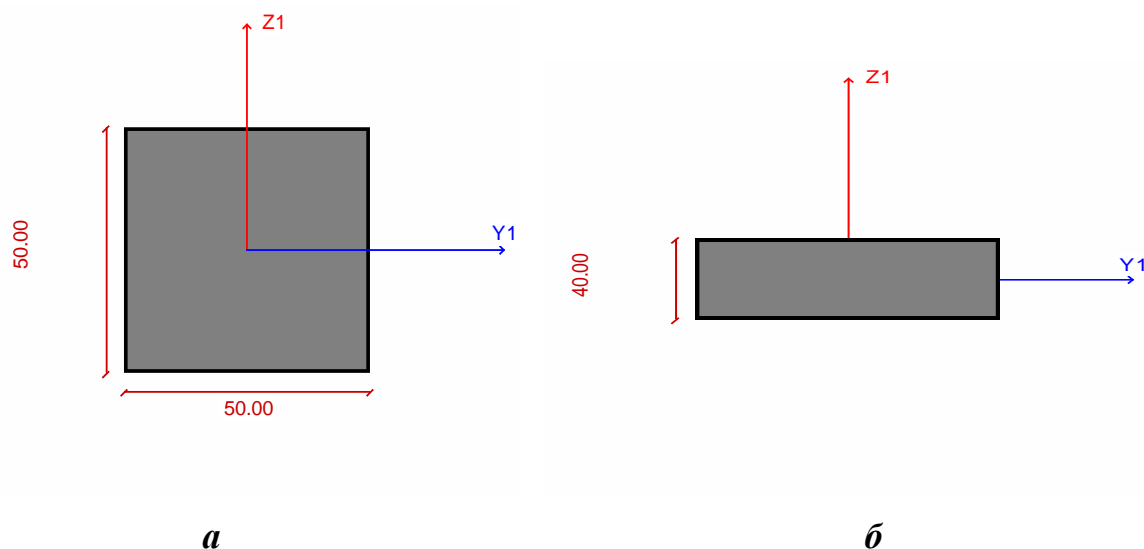


Рис. 5.3 Жорсткість колон «Брус 50×50 » (а) та перекриттів «Пластина Н 40» (б)

Таблиця 5.1

Характеристики залізобетонних колон

Ім'я	Коментар	$E, \text{ т/м}^2$	$R_0, \text{ т/м}^3$	$EF, \text{ т}$	$EI_y, \text{ т}\cdot\text{м}^2$	$EI_z, \text{ т}\cdot\text{м}^2$	$GI_k, \text{ т}\cdot\text{м}^2$	$Y1, \text{ см}$	$Y2, \text{ см}$	$Z1, \text{ см}$	$Z2, \text{ см}$	$q, \text{ т/м}$	$GF_y, \text{ т}$	$GF_z, \text{ т}$
Брус 50x50	Залізобетон колон	$306 \cdot 10^4$	2,5	765000	15937	15937	11156	8,3	8,3	8,3	8,3	0,6	265625	265625

Таблиця 5.2

Жорсткісні характеристики плити перекриття

Ім'я	Коментар	$E(E1), \text{ т/м}^2$	$R_0, \text{ т/м}^3$	$V12(V)$	$H, \text{ см}$
Пластина Н 20	Залізобетон плит	2750000	2,5	0,2	20

Таблиця 5.3

Жорсткісні характеристики. Пластини(теплопровідність)

Ім'я	Коментар	Н, см	λ , Вт/(м·°С)	C_p , Дж/(кг·°С)	R_0 , Н/м ³
Теплопровідність	Залізобетон	200	0.850	1100	23030
Теплопровідність	Вогнезахист	100	0.071	2000	5000

Таблиця 5.4

Жорсткісні характеристики. Стержні (конвекція)

Ім'я	Коментар	Н, см	α , Вт/(м ² ·°С)
Конвекція		100	25

На рис. 5.4 показано створену в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» скінчено-елементну модель трьохповерхового паркінгу, задані навантаження на конструкції паркінгу.

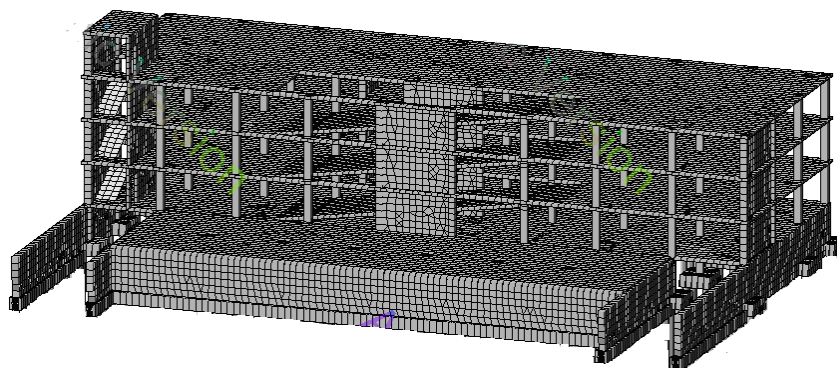


Рис. 5.4 Скінчено-елементна 3D модель трьохповерхового паркінгу

Було змодельовано варіанти пожеж для дослідження вогнестійкості (стійкості) будівлі залежно від місця виникнення та пожежного навантаження на вогнезахиснені залізобетонні конструкції будівлі паркінгу (рис. 5.5).

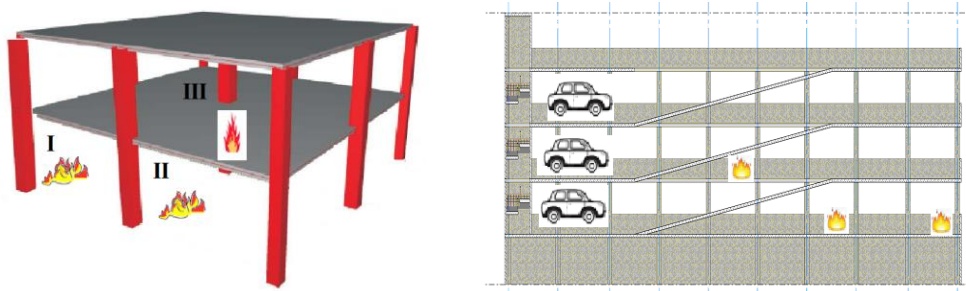


Рис. 5.5 Варіанти розрахункових сценаріїв виникнення пожежі в паркінгу: I – біля лівої колони; II – біля крайньої центральної колони; III – біля центральної колони в центрі паркінгу

В результаті чисельного моделювання було встановлено місце виникнення пожежі, наслідки від якої призведуть до найбільших значень зусиль та навантажень в конструкціях, що призведуть до втрати несучої здатності конструкцій, і, як наслідок, до втрати загальної стійкості будівлі паркінгу (рис. 5.6).

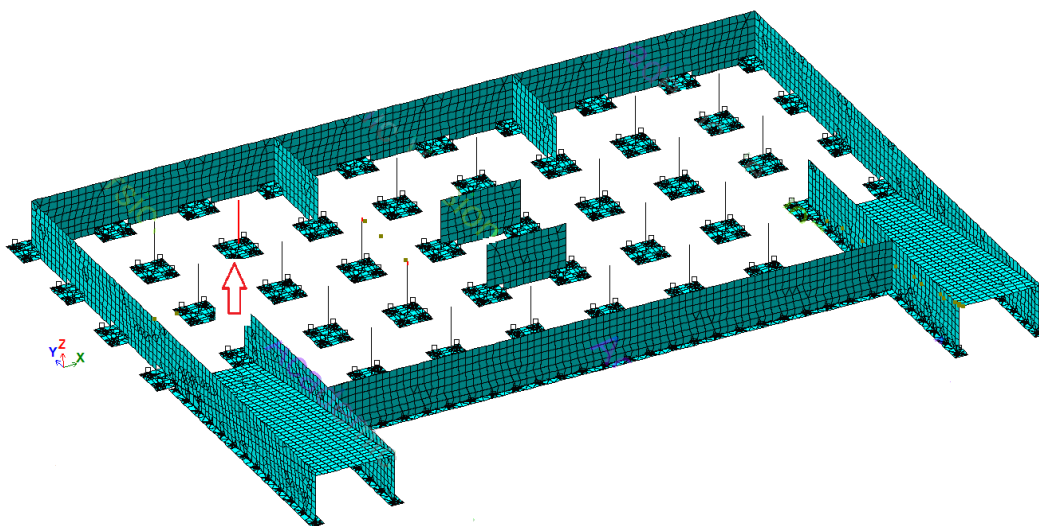


Рис. 5.6 Місце виникнення пожежі, наслідки від якої призведуть до найбільших значень зусиль та навантажень в конструкціях

Для розрахунків нерівномірних розподілів температури в поперечному перерізі вогнезахищеної залізобетонної колони застосовували математичну модель нестационарної теплопровідності, математичний апарат якої використано в програмі «ЛПРА-САПР». Модель являє собою диференційне рівняння теплопровідності, яка враховує радіаційно-конвективний теплообмін від газового середовища до обігрівних поверхонь колони (обігрів з 4-ох сторін) (граничні умови III-го роду), теплообмін теплопровідністю в колоні. Для розв'язання рівняння теплопровідності використовувався метод скінчених елементів, реалізований в програмі «ЛПРА-САПР». Під час моделювання нестационарного прогріву залізобетонної колони в програмному комплексі «ЛПРА-САПР» використана модель колони (рис. 5.7).



Рис. 5.7 Модель вогнезахищеної колони

Задані параметри бетону та сталі розв'язанням обернених задач теплопровідності (табл. 5.5–5.6).

Таблиця 5.5

Значення коефіцієнту теплопровідності бетону

Температура, °C	Коефіцієнт теплопровідності бетону λ_b , Вт/(м·°C)
0	2
500	1,08
1000	0,6
1200	0,6

Значення теплоємності бетону

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

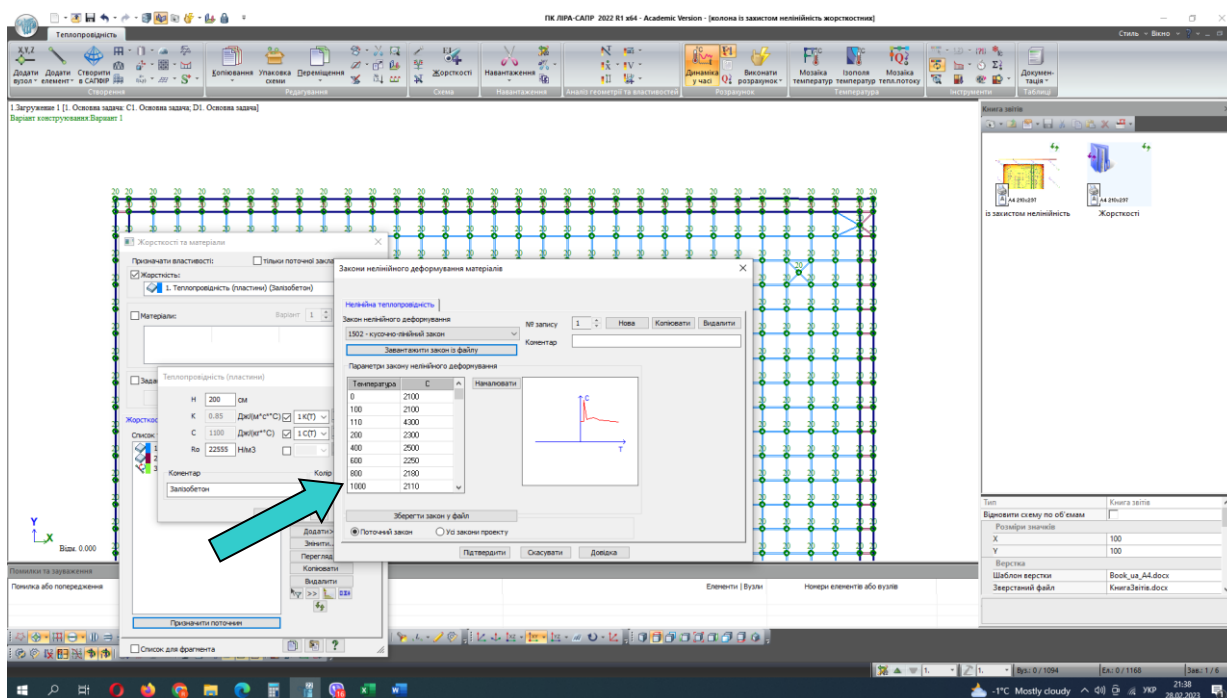


Рис. 5.8 Діалогове вікно програми «ЛІРА-САПР» для задавання теплофізичних характеристик бетону, арматури

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

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

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

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

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

θ_0 – початкова температура, $\theta_0 = 6$ °С, коефіцієнт Пуассона сталі $\nu=0,3$, початковий модуль пружності сталі $E_s=2,1 \cdot 10^5$ МПа.

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

5.4 Заходи з підвищення меж вогнестійкості будівельних конструкцій конструктивної системи будівлі

В програмі «ЛІРА-САПР» реалізовані підходи, засновані на тому, що якщо необхідно підвищити межу вогнестійкості залізобетонної колони до нормованих значень, то це досягається проєктуванням додаткової арматури. У випадку якщо необхідно підвищити межу вогнестійкості колони з 150 до 180 хвилин, площу армування збільшують в 10 разів. Так, для забезпечення межі вогнестійкості 150 хв залізобетонної колони квадратного перерізу розмірами $0,5 \times 0,5 \times 3$ м максимальна площа армування є $5,55$ см². Для забезпечення межі вогнестійкості 180 хв. така сама колона потребує збільшення максимальної площі армування до $58,7$ см². Такі підходи використовують під час проєктування будівель та споруд, проте взагалі не прийнятні для експлуатації вже побудованих будівель, та коли необхідно підвищити межі вогнестійкості залізобетонних конструкцій до нормованих значень.

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

На рис. 5.10 показано результати чисельного моделювання залізобетонної колони квадратного перерізу розмірами $0,5 \times 0,5 \times 3$ м та температура в арматурних стержнях (рис. 5.11) в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі (рис. 5.9).

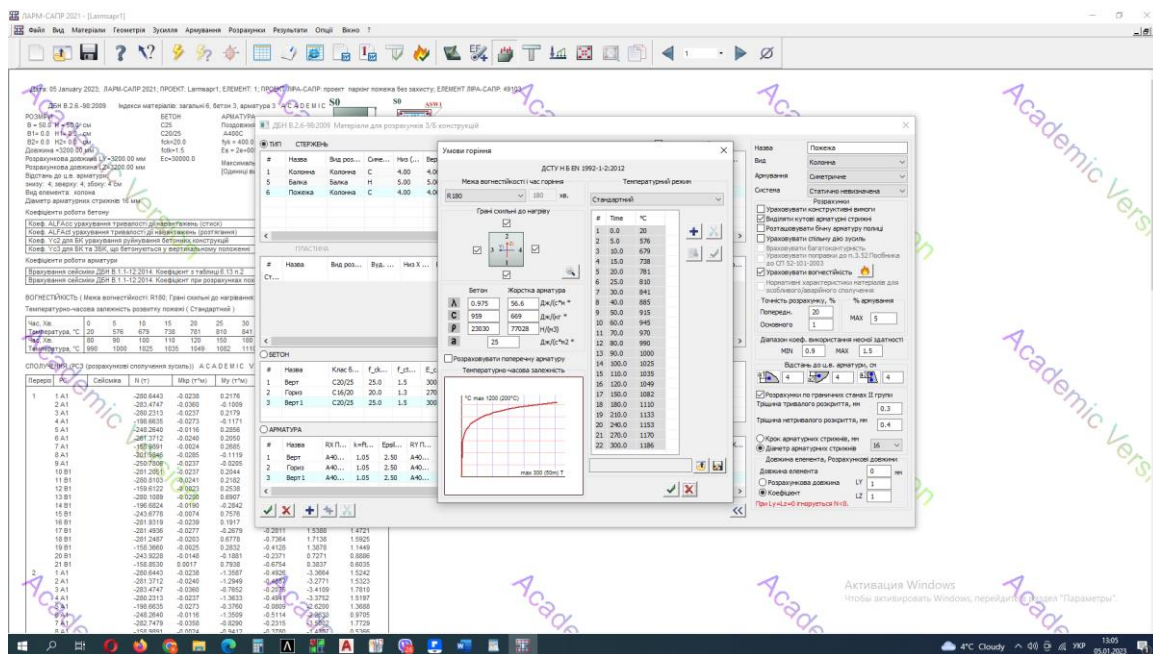


Рис. 5.9 Діалогове вікно програми «ЛІРА-САПР» для задавання режимів пожежі, властивостей бетону, арматури

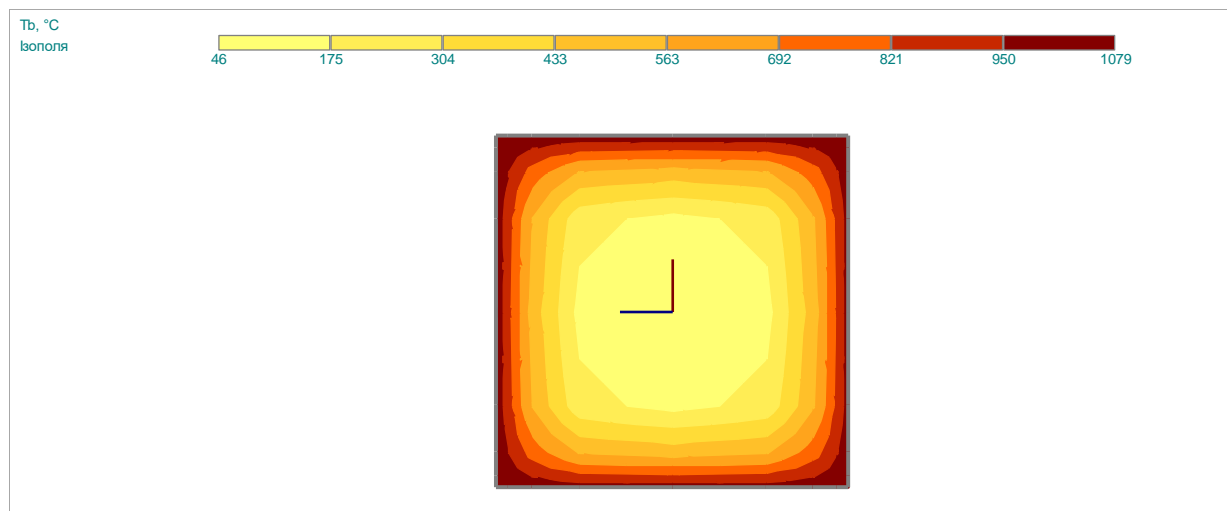


Рис. 5.10 Розподіл температур у залізобетонній колоні на 150 хвилині випробування

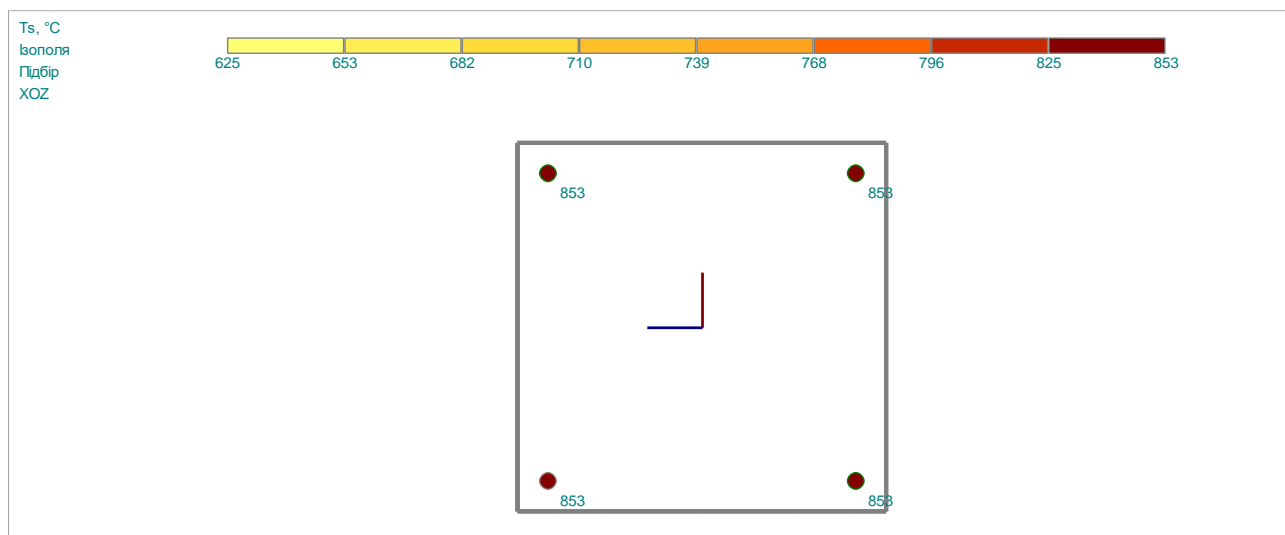


Рис. 5.11 Температура в арматурі на 150 хвилині випробування

Як видно із рис. 5.11 температура на арматурних стержнях досягає 853 °С, що є достатнім для забезпечення вогнестійкості R 150 при даних розрахункових зусиллях в колоні.

Мозаїка переміщень по вісі Z при цьому не значна та складає 1,1 мм (рис. 5.12).



Рис. 5.12 Мозаїка переміщень по Z, еюра N, еюра Му у залізобетонній колоні на 150 хвилині випробування

В разі підвищення межі вогнестійкості колони до 180 хвилин розподіл температур в перерізі та на арматурних стержнях буде становити, як показано на рис. 5.13, 5.14.

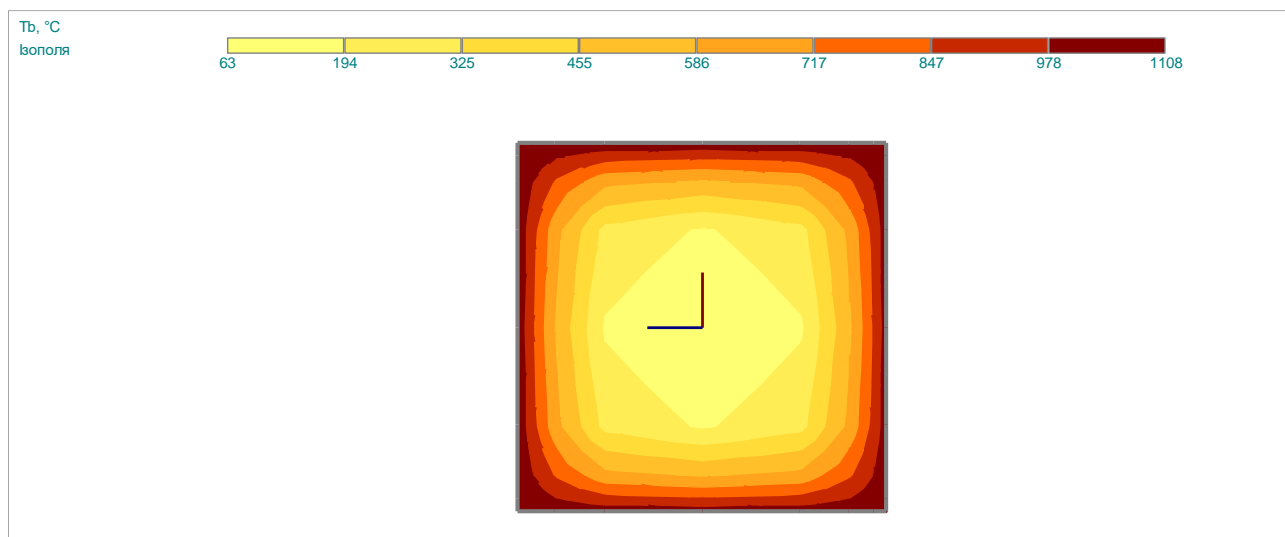


Рис. 5.13 Розподіл температур у залізобетонній колоні на 180 хвилині випробування

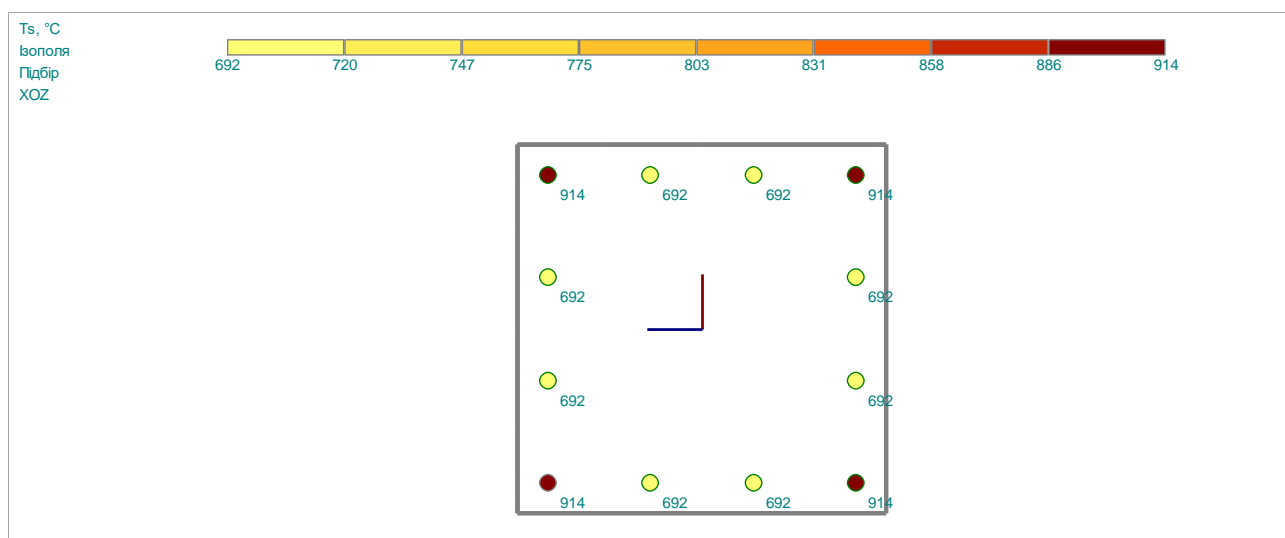


Рис. 5.14 Температура в арматурі при 180 хв без захисту

Як видно із рис. 5.14 температура на кутових арматурних стержнях досягає 914 °C, та з'являється додаткова арматура. Це вказує на те, що існуючої

арматури не достатньо для забезпечення вогнестійкості R180 хв при даних розрахункових зусиллях в колоні. Тому наступним кроком було підвищення вогнестійкості залізобетонної колони до нормованих значень межі вогнестійкості 180 хвилин за допомогою використання вогнезахисних покриттів.

Для підвищення межі вогнестійкості залізобетонної колони до 180 хв. розмірами $0,5 \times 0,5 \times 3$ м можливо застосування вогнезахисних покриттів з науково обґрунтованими параметрами. До таких параметрів слід віднести: вид, товщину вогнезахисного покриття, місця нанесення та умови експлуатації. Для підвищення вогнестійкості залізобетонних конструкцій найбільш ефективні та переважно використовуються пасивні вогнезахисні покриття. Було обрано таке пасивне вогнезахисне покриття, коефіцієнт теплопровідності якого знайдено в попередніх розділах (рис. 4.5). Питома об'ємна теплоємність покриття була знайдена розв'язанням обернених задач теплопровідності і склала $C_v = 10^6$ Дж/(м³·°C).

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

В результаті чисельного моделювання були отримані розподіли температур у вогнезахищеній залізобетонній колоні на 180 хв. вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі при обігріві колони з чотирьох сторін (рис. 5.15).

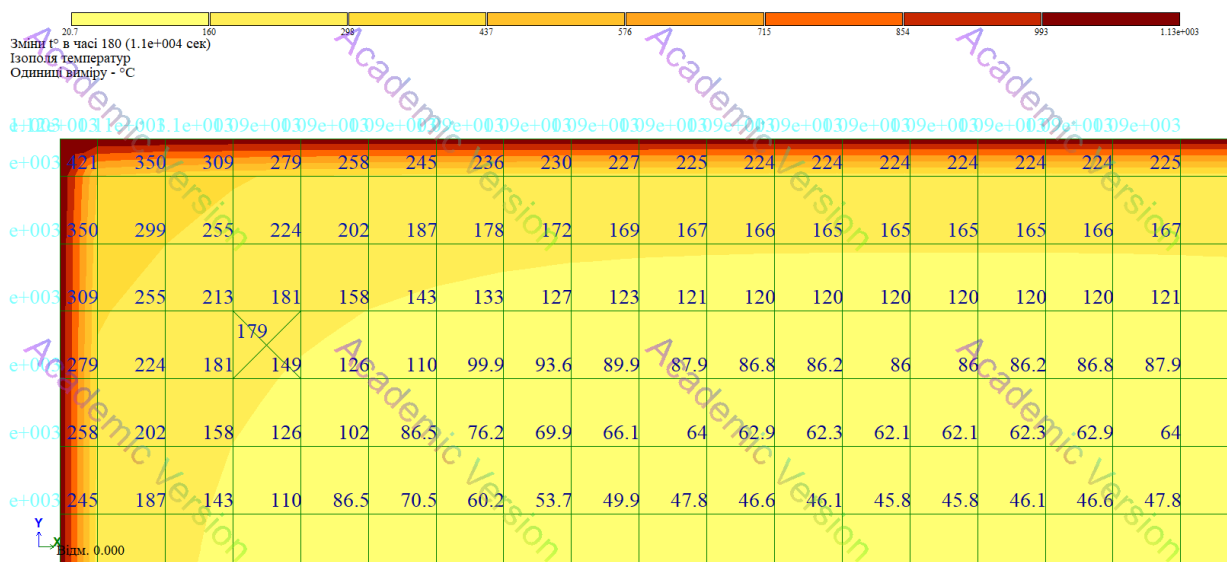


Рис. 5.15 Розподіл температур в вогнезахисній залізобетонній колоні на 180 хвилині випробування

Як видно із рис. 5.15, пасивне вогнезахисне покриття з науково обґрунтованими параметрами з заданою товщиною дозволяє знизити температуру на кутових арматурних стержнях в 4 рази. Вказане створює умови для ефективного підвищення меж вогнестійкості залізобетонних конструкцій без проектування додаткового армування.

Проведено скінчено-елементний аналіз розглянутої вогнезахисної залізобетонної колони. Розрахунок проводився із врахуванням фізичної нелінійності при формуванні параметрів. Для врахування нелінійності параметрів бетону (модуль пружності, коефіцієнт лінійної температурної деформації, граничну відносну деформацію) в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» був обраний простий кроковий метод з кількістю кроків рівним 30 (рис. 5.16).

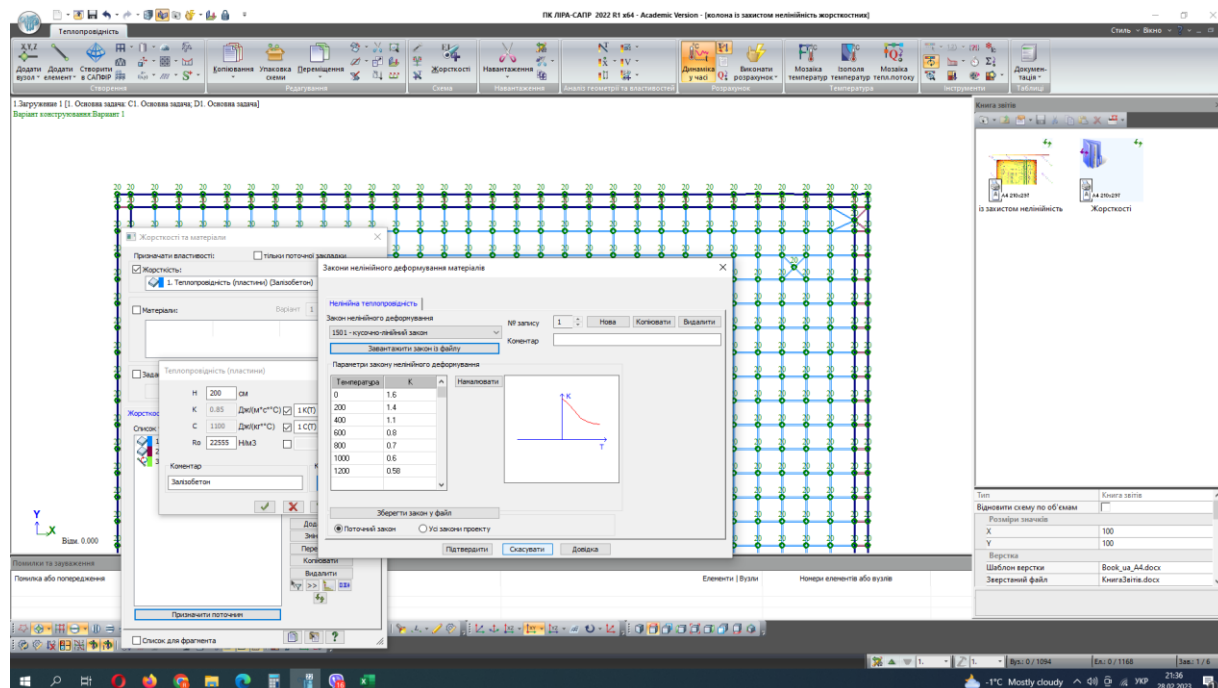


Рис. 5.16 Формування закону нелінійних деформацій

Обрано закон нелінійного деформування бетону, що застосовуються в програмному комплексі «ЛІРА-САПР»: 1501 – кусково-лінійний закон деформування.

5.5 Оцінювання вогнестійкості конструктивної системи будівлі в цілому за допомогою розробленої моделі

Для деталізації результатів розрахунку була виділена частина конструктивної будівлі паркінгу (рис. 5.17), на якій більш детально показано вплив навантажень від власної ваги конструкцій, постійних та тимчасових навантажень.

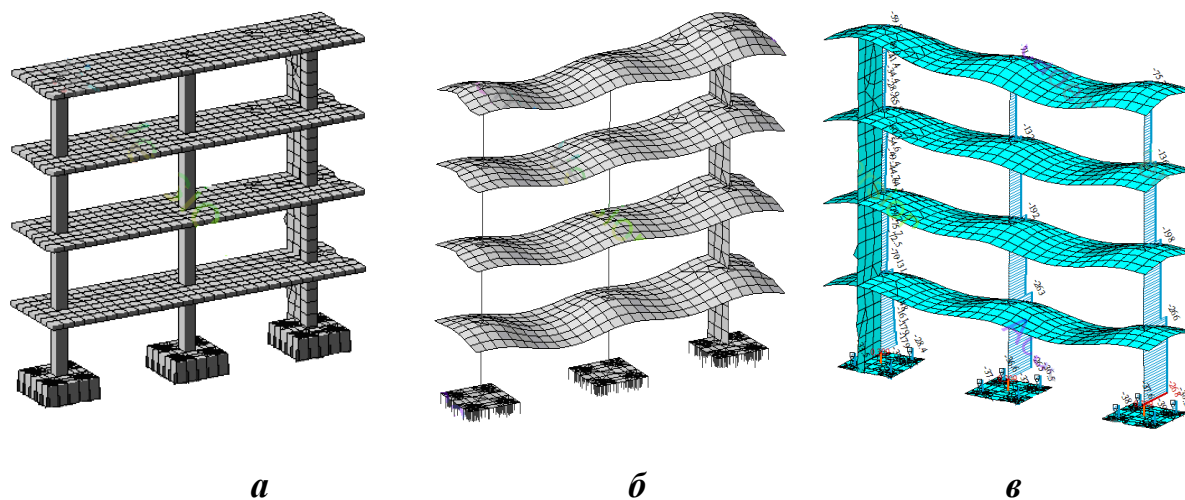


Рис. 5.17 Частина схеми будівлі паркінгу (а), деформативна схема (б) та еюра зусиль в колонах (в)

На рис. 5.18 показано мозаїку переміщень по вісі Z від додаткових навантажень.

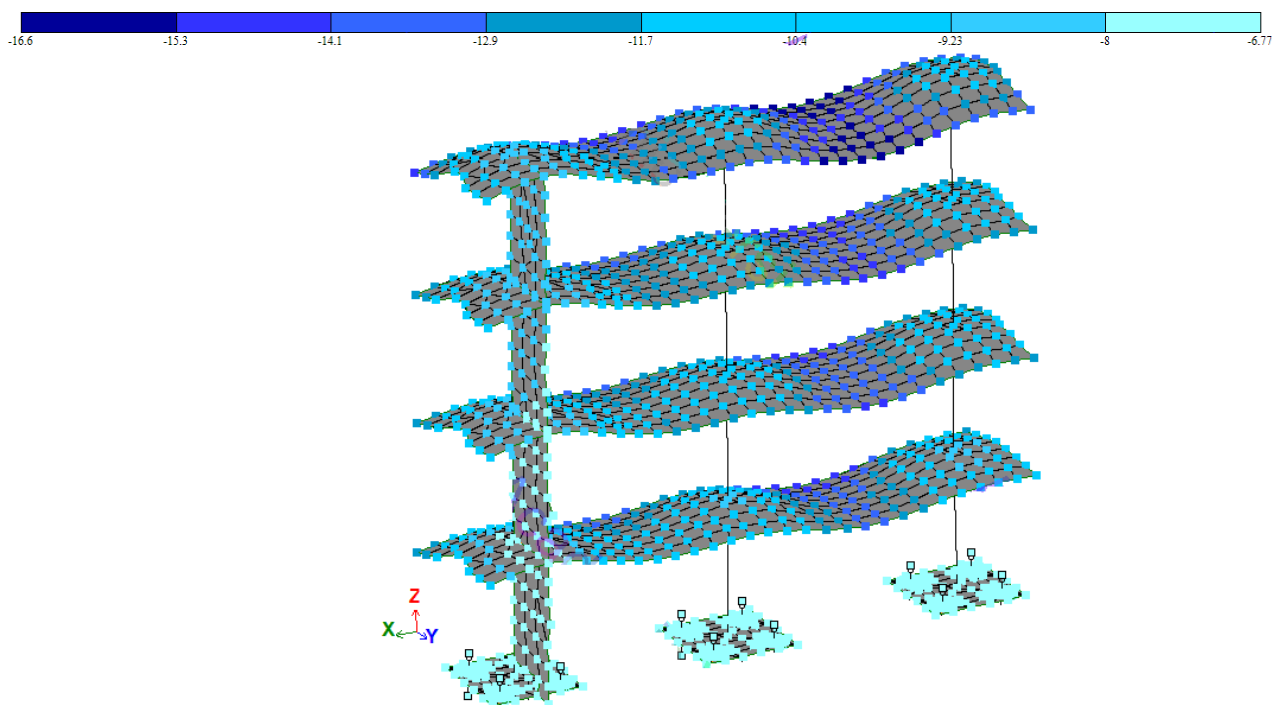


Рис. 5.18 Мозаїка переміщень по Z

На рис. 5.19 показані мозаїки напружень по M_x та M_y .

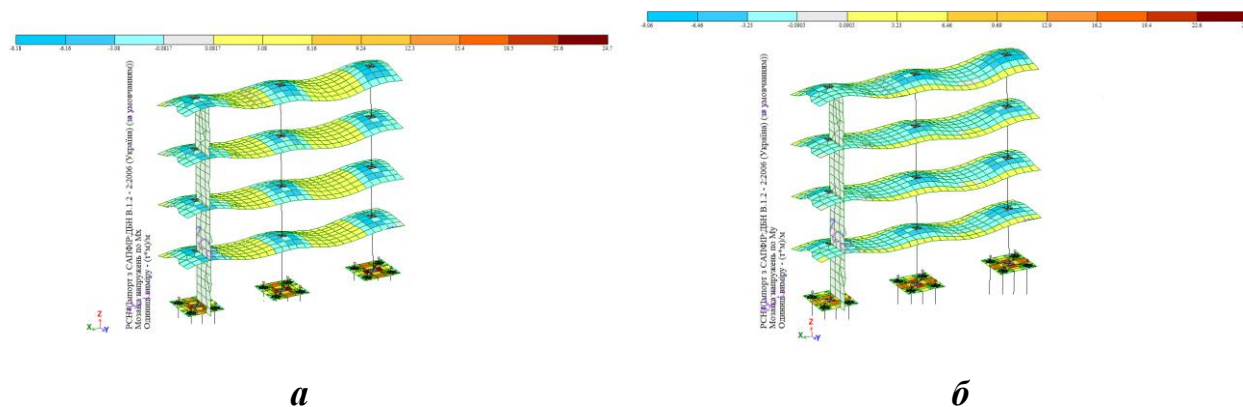


Рис. 5.19 Мозаїки напружень по M_x (а) та M_y (б)

На рис. 5.20 представлено результати розрахунків межі вогнестійкості будівельних конструкцій будівлі паркінгу та мозаїку переміщень по вісі $Z(G)$ (рис. 5.21).

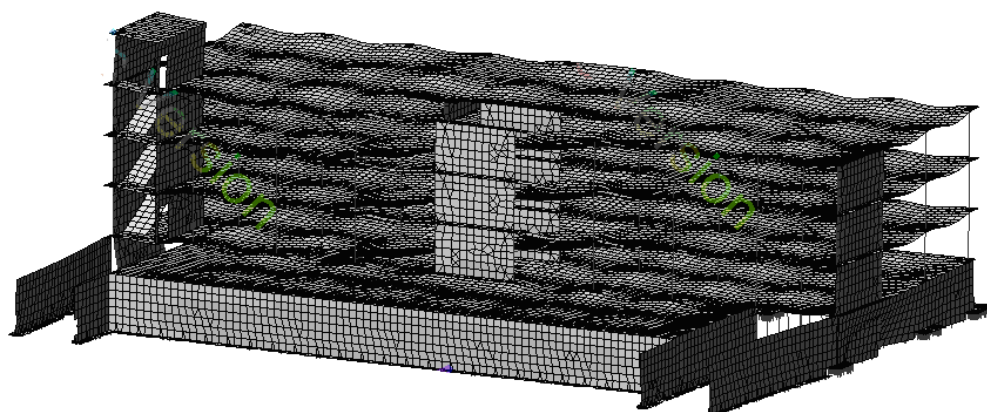


Рис. 5.20 Результати розрахунку межі вогнестійкості конструкцій за розрахункових сценарієм виникнення пожежі в паркінгу (I)

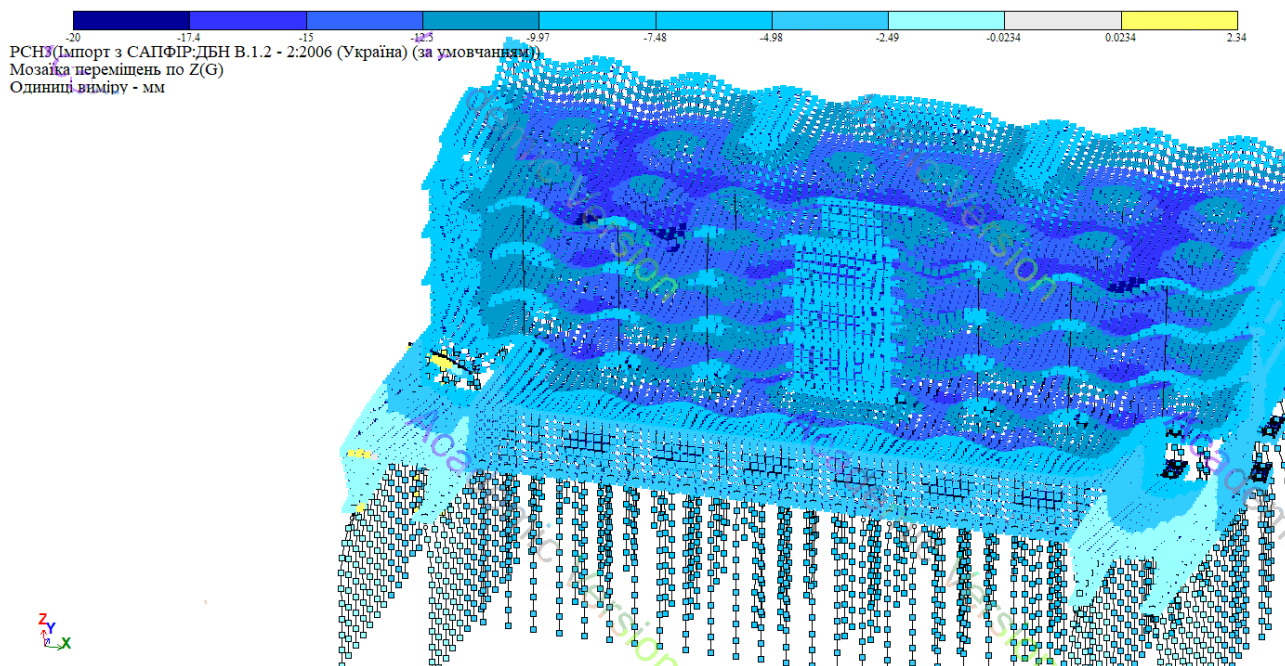


Рис. 5.21 Мозаїка переміщень по Z(G)

В результаті проведених розрахунків встановлено, що кожна будівля є індивідуальною в плані архітектурно-планувальних і конструктивних рішень. В свою чергу це свідчить про те, що не існує єдиного правильного варіанта як у разі прогнозування втрати вогнестійкості і, як наслідок, втрати несучої здатності будівельних конструкцій і будівлі в цілому, так і у разі застосування заходів із забезпечення вогнестійкості вогнезахисених будівельних конструкцій. Це підтверджується результатами чисельного моделювання будівлі паркінгу в програмному комплексі «ЛІРА-САПР» [265].

Висновки до розділу 5

1. Розроблено комп'ютерні моделі теплового та напружено-деформованого стану будівлі трьохповерхового паркінгу для автомобілів, яка складається із вогнезахисних конструкцій, що враховують: теплофізичні характеристики вогнезахисних покриттів, теплофізичні та механічні властивості матеріалів, з яких складається конструкція, нелінійні закони деформування матеріалів моделі, механічні властивості матеріалів при високотемпературних та силових впливах.

2. Проаналізовані варіанти виникнення пожеж в паркінгу для дослідження вогнестійкості (стійкості) будівлі та виявлено найбільш уразливі конструкції, виключення яких із конструктивної схеми призведе до найбільших збитків при пожежі та в подальшому до втрати стійкості будівлі в цілому.

3. Проведено моделювання нестационарного прогріву залізобетонної колони паркінгу квадратного перерізу, розмірами $0,5 \times 0,5 \times 3$ м за умов впливу стандартної пожежі протягом 150 хвилин. При цьому встановлено, що температура на арматурних стержнях досягає 853 °C, що є достатнім для забезпечення вогнестійкості R150 при даних розрахункових зусиллях в колоні, а мозаїка переміщень по вісі Z була не значною та склала 1,1 мм. Максимальна площа армування склала $5,55$ см².

4. При забезпеченні вогнестійкості R180 при даних розрахункових зусиллях в колоні температура на кутових арматурних стержнях досягла 914 °C та програма прорахувала додаткову арматуру. Це вказує на те, що існуючої арматури не достатньо для забезпечення вогнестійкості R180 при даних розрахункових зусиллях в колоні, тому максимальна площа армування в результаті перерахунку програмою підвищилась до $58,7$ см² (в 10 разів більше від початкової). Відтак, зроблено висновок, що підвищення вогнестійкості залізобетонної колони до нормованих значень межі вогнестійкості 180 хвилин можливе як за рахунок збільшення площі армування колони, так і

використанням вогнезахисних покриттів з науково обґрунтованими параметрами.

Встановлено, що підходи щодо збільшення площі армування мають місце при проектуванні будівель та споруд, проте взагалі не прийнятні при експлуатації вже побудованих будівель та при необхідності підвищення меж вогнестійкості залізобетонних конструкцій до нормованих значень.

5. Запропоновано заходи з підвищення меж вогнестійкості конструкцій, що полягають у використанні вогнезахисних покриттів з науково обґрунтованими параметрами. При цьому обґрунтовано товщину пасивного вогнезахисного покриття, коефіцієнт теплопровідності, питому теплоємність, які потрібно забезпечити при оцінюванні вогнестійкості вогнезахищеної залізобетонної колони та підвищення меж вогнестійкості до 180 хвилин.

При чисельних розрахунках нестационарного прогріву вогнезахищеної залізобетонної колони паркінгу (товщина покриття 11 мм) за умов впливу стандартної пожежі протягом 180 хвилин встановлено, що температура на арматурних стержнях досягла 213 °С, що в 4 рази менше від прогріву незахищеної колони.

РОЗДІЛ 6

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

Визначено економічну ефективність застосування методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. Проведено техніко-економічне обґрунтування застосування вогнезахисних залізобетонних конструкцій з обґрунтованими товщинами вогнезахисних покриттів.

6.1 Визначення економічної ефективності застосування методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій

Визначення економічного ефекту від застосування розрахунково-експериментального методу в даному підрозділі проведено на прикладі пасивного вогнезахисного покриття «Неоспрей» для захисту залізобетонних перекриттів.

Вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних багатопустотних перекриттів може бути визначена двома способами – експериментальним і розрахунково - експериментальним.

Експериментальний метод полягає у проведенні випробувань на вогнестійкість певної кількості зразків конструкції з вогнезахисним покриттям, нанесеним з різною товщиною, яка забезпечує нормовані значення 60; 90; 120, 150, 180, 240 хв в умовах стандартного температурного режиму пожежі.

Розроблений розрахунково-експериментальний метод базується на експериментальному визначенні температури на зразках конструкції, визначенні теплофізичних характеристик покриттів із застосуванням отриманих даних температури, шляхом розв'язання оберненої задачі

теплопровідності та розрахунку шляхом розв'язання прямої задачі теплопровідності необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для різних значень межі вогнестійкості. Цей метод знайшов відображення у роботі при оцінюванні вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних багатопустотних перекриттів.

Визначення економічної ефективності розрахунково-експериментального методу здійснювалося шляхом порівняння витрат, необхідних для визначення мінімальної товщини вогнезахисного покриття експериментальним шляхом і за допомогою методу:

$$E = W_{\text{експ}} - W_{\text{розн}}, \quad (6.1)$$

де E – економічна ефективність, грн.;

$W_{\text{експ}}$ – витрати на визначення вогнезахисної ефективності покриття експериментальним методом;

$W_{\text{розн}}$ – витрати на визначення вогнезахисної ефективності покриття розрахунково-експериментальним методом.

$$W_{\text{експ}} = V_{\text{зр}} + V_{\text{випр}}, \quad (6.2)$$

де $V_{\text{зр}}$ – вартість зразків для випробувань, грн.;

$V_{\text{випр}}$ – вартість випробувань, грн.

$$W_{\text{розн}} = V_{\text{зр}} + V_{\text{експ}} + V_{\text{розн}}, \quad (6.3)$$

де $V_{\text{експ}}$ – вартість проведення експерименту з визначення температури на поверхні зразків, грн.;

$V_{\text{розн}}$ – вартість розрахунків необхідної мінімальної товщини покриття, грн.

Дані щодо вартості робіт з нанесення вогнезахисної речовини для підготовки зразків до випробувань на вогнестійкість наведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Дані щодо вартості робіт з підготовки зразків до випробувань

Назва вогнезахисного покриття	Площа поверхні, на яку наноситься вогнезахисна речовина, м ²	Вартість 1 м ² покриття, грн.	Вартість робіт з монтажу (нанесення) речовини за 1 м ² , грн.	Загальна вартість робіт для 1 зразка, грн.
«Неоспрей»	7,7	500	150	5000

Вартість випробувань для різних значень межі вогнестійкості наведено в табл. 6.2.

Таблиця 6.2

Дані щодо вартості випробувань залежно від часу вогневого впливу

Межа вогнестійкості багатопустотного залізобетонного перекриття	Вартість випробування при стандартному температурному режимі, грн.
60	15894
90	17490
120	18720
150	22158
180	24966
240	30000

Загальну вартість випробувань з визначення вогнезахисної здатності покриттів наведено в табл. 6.3.

Таблиця 6.3

Загальна вартість випробувань з визначення вогнезахисної здатності покриттів

Назва вогнезахисного покриття	Кількість зразків, шт	Вартість зразків, грн.	Загальна вартість випробувань, грн.
«Неоспрей»	16	80000	129228

Із застосуванням даних табл. 6.1 – 6.3 отримали значення $W_{\text{експ}}$ витрат на визначення вогнезахисної ефективності покриття експериментальним методом для пасивного вогнезахисного покриття «Неоспрей» $W_{\text{експ 1}}$.

$$W_{\text{експ 1}} = 80000 + 129228 = 209228 \text{ грн.}$$

6.2 Техніко-економічне обґрунтування застосування вогнезахисних покриттів залізобетонних конструкцій з науково обґрунтованими значеннями товщини

Економічну ефективність окремих протипожежних заходів, а також проектних рішень із різними варіантами протипожежного захисту оцінюють порівнянням витрат, пов'язаних із цими протипожежними заходами, зі змінами розміру матеріальних втрат від пожежі у разі їх виконання:

$$Z < M(\Pi - \Pi^*), \quad (6.4)$$

Z – зміна приведених витрат, що пов'язана з виконанням протипожежних заходів, грн./ м²;

$M (P - P^*)$ – математичне очікування зниження втрат від пожеж за умови виконання протипожежних заходів;

P – втрати від пожежі за умови відсутності протипожежного заходу, ефективність якого оцінюється, грн;

P^* – втрати від пожежі за умови виконання протипожежного заходу, який оцінюється, грн.

Втрати від пожеж визначаються як сума прямих і побічних збитків, завданих ними:

$$P = P_{\text{пр}} + P_{\text{поб}}, \quad (6.5)$$

де $P_{\text{пр}}$ – прямі збитки від , грн.;

$P_{\text{поб}}$ – побічні збитки від пожежі, грн.

$$P_{\text{поб}} = P_{\text{пр}} \cdot K_{\text{поб}}, \quad (6.6)$$

де $K_{\text{поб}}$ – коефіцієнт побічних збитків

Із використанням такого підходу було визначено ефективність застосування пасивного вогнезахисного покриття «Неоспрей» для забезпечення нормованого значення межі вогнестійкості 180 хв в умовах температурного режиму стандартної пожежі залізобетонних багатопустотних перекриттів паркінга загальною довжиною 52 м із пропускною здатністю 0,5 тис. автомобілів за добу.

Для розв'язання поставленого завдання було обрано такі вихідні дані.

Проектна вартість будівництва 1 м погонного паркінга – 0,2 млн. грн.

Площа поверхні залізобетонних перекриттів, на яку необхідно нанести вогнезахисну речовину – 1743 м².

Вартість 1 м² вогнезахисного покриття «Неоспрей» – 500 грн.

Вартість нанесення штукатурного складу – 150 грн / м².

Вартість витрат на улаштування системи вогнезахисту залізобетонних перекриттів з використанням вогнезахисної штукатурки «Неоспрей» становить:

$$B_1 = (500 + 150) \cdot 1743 = 1132950 \text{ грн.}$$

Були визначені можливі втрати від пожежі, якою було пошкоджено 52 м погонних паркінгу, знищено та пошкоджено автотранспортні засоби. Для цього варіанту – вогнезахисні покриття залізобетонних перекриттів відсутні. Прямі збитки становлять 10% від проектної вартості 5,2 м погонних паркінгу, коефіцієнт побічних збитків 2,5. Таким чином:

$$П = 1040000 + 2600000 = 3640000 \text{ грн.}$$

де 1040000 грн. – прямі збитки згідно (6.5); 2600000 грн. – побічні збитки згідно (6.6).

Результати розрахунку можливих втрат від пожежі за умови наявності вогнезахисного покриття «Неоспрей» (коефіцієнт побічних збитків 1,1):

$$П_1^* = 113295 + 124625 = 237919 \text{ грн.,}$$

де 113295 грн. – втрати від пошкодження вогнезахисного покриття на площі 1743 м² (52 м погонних паркінгу).

Результати розрахунків свідчать, що за умови застосування вогнезахисних покриттів з необхідною товщиною для забезпечення нормованої межі вогнестійкості залізобетонних перекриттів, втрати від пожежі у паркінгу для автомобілів можливо зменшити у 15 разів при використанні вогнезахисного штукатурного покриття «Неоспрей».

6.3. Розрахунок економічного ефекту від впровадження розроблених методів оцінювання вогнестійкості вогнезахисних конструкцій

Проведені розрахунки економічного ефекту від впровадження розробленого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних конструкцій за допомогою програмного комплексу АВК - 5 (версія 3.8.1). Розрахунки проведені на прикладі паркінгу для автомобілів, для якого була побудована модель в програмному забезпеченні ЛПРА в підрозділі 6.1. В результаті розрахунків отримані дані, представлені нижче.

Кількість залізобетонних колон – 166.

Розміри $0,5 \times 0,5 \times 3$ м.

Клас бетону С20/25. Густина арматури 7850 кг/м^3 .

Товщина вогнезахисного покриття 11 мм.

Згідно розрахунку максимальна площа арматури в перерізі $5,55 \text{ см}^2$.

Згідно мінімального проценту армування (0,5%) площа арматури $50 \times 50 \times 0,5 / 100 = 12,5 \text{ см}^2$

Вага арматури на одну колону $0,00125 \times 3 \times 7850 = 29,43 \text{ кг}$.

Площа арматури без вогнезахисного обробляння колон $58,7 \text{ см}^2$.

Вага арматури на 1 колону $0,00587 \times 7850 \times 3 = 138 \text{ кг}$.

Загальна вага арматури $166 \times 138 = 22908 \text{ кг}$.

Загальна витрата сталі на армування $29,43 \times 166 = 4885 \text{ кг}$

Площа обробки вогнезахисним покриттям колон складає $0,5 \times 0,5 \times 3 = 0,75 \text{ м}^2$.

Загальна площа вогнезахисного обробляння колон $166 \times 0,75 = 124,5 \text{ м}^2$.

Об'єм вогнезахисного шару на 1 колону $0,5 \times 0,5 \times 3 \times 0,011 = 0,00825 \text{ м}^3$

Загальний об'єм вогнезахисного шару $0,00825 \times 166 = 1,37 \text{ м}^3$

Густина вогнезахисного покриття – 500 кг/м^3 .

Загальна вага вогнезахисного покриття $1,37 \times 500 = 685 \text{ кг}$.

Загальний об'єм бетону $0,5 \times 0,5 \times 3 \times 166 = 124,5 \text{ м}^3$.

Згідно розрахунку витрати на влаштування без захисту становлять 1640336 грн.

Згідно розрахунку витрати із влаштування вогнезахисту становлять 1297802 грн.

Економічний ефект складає $1640336 - 1297802 = 342\,534$ грн. (економія 21 %).

В додатках II та I представлені локальні кошториси, розроблені в комплексі АВК-5 на будівельні роботи щодо підвищення вогнестійкості залізобетонних колон за допомогою додаткового армування (дод. II) або використанням вогнезахисних покриттів (дод. I).

Висновки до розділу 6

1. Визначено економічну ефективність застосування методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. Показано, що витрати при використанні розрахунково-експериментального методу під час оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій (на прикладі паркінгу для автомобілів) у 6 разів менші, ніж витрати під час оцінювання експериментальним методом.

2. Проведено техніко-економічне обґрунтування застосування вогнезахисних залізобетонних конструкцій з науково обґрунтованими товщинами вогнезахисних покриттів. Встановлено, що у разі використання такого протипожежного заходу, втрати від пожежі в паркінгу для автомобілів можливо зменшити у 15 разів.

3. Проведені розрахунки економічного ефекту від впровадження розробленого методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних конструкцій на прикладі паркінгу для автомобілів. Встановлено, що витрати від використання підходу щодо підвищення вогнестійкості залізобетонних колон шляхом застосування вогнезахисних покриттів в 5 разів менші від витрат при використанні додаткового армування для підвищення межі вогнестійкості залізобетонної колони з 150 до 180 хвилин (економія 21 %).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

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

В результаті дисертаційного дослідження отримані наступні наукові та практичні результати:

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

2. Визначено особливості впливу найбільш значущих параметрів у системі «залізобетонна конструкція – вогнезахисне покриття» на вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій, які впливають на тепловий та напружено-деформований стан зазначених конструкцій. До таких

параметрів віднесено товщину вогнезахисного покриття, коефіцієнт теплопровідності, питому об'ємну теплоємність вогнезахисного покриття та матеріал конструкції, механічні характеристики будівельної конструкції, режими пожежі, умови випробувань. Встановлено, що вказані параметри є базовими для подальших розрахунків, які потрібно забезпечувати та/або враховувати під час процесу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних будівельних конструкцій.

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

Встановлено, що зі збільшенням відносної вологості понад 90 %, утриманням температури навколишнього середовища на рівні менше 30 °С та концентрації у повітрі твердих домішок понад 70 мкг/м³, коефіцієнт теплообміну досягає раціональних значень в межах 70–77 Вт/(м²·°С) та вище. Зменшення концентрації твердих домішок до рівня 50 мкг/м³ спричиняє зменшення коефіцієнта теплообміну до 45 Вт/(м²·°С), а з одночасним зменшенням температури навколишнього середовища до 10 °С коефіцієнт теплообміну починає підвищуватися до 65 Вт/(м²·°С).

3. Розроблено розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій, який відрізняється від наявних ідентифікацією теплофізичних характеристик моделі на основі розв'язання обернених задач теплопровідності за даними випробувань на вогнестійкість, визначенням мінімальної товщини вогнезахисного покриття за результатами випробувань на вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій за різних умов випробувань та значеннях чинників впливу. Встановлено, що різниця між значеннями мінімально необхідної товщини вогнезахисного покриття для стандартного температурного режиму та

температурного режиму вуглеводневої пожежі становить близько 12 %, а різниця між значеннями необхідної товщини вогнезахисного покриття для стандартного температурного режиму та температурного режиму тунельної пожежі за стандартами Нідерландів (RWS) – 29 %. Експериментально виявлено вплив кліматичних факторів на вогнестійкість вогнезахисних будівельних конструкцій. Встановлено, що внаслідок еквівалентного трирічного впливу кліматичних факторів (за методикою пришвидшеного старіння) характерних для приміщення, що не опалюється, значення теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття не відрізняються від початкового значення.

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

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

На основі методологічної бази розроблено математичну модель будівлі для розрахунково-експериментального оцінювання вогнестійкості, що дозволяє проводити моделювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій, конструктивної системи чи її частини та оцінювати рівень пожежної безпеки об'єкта в частині забезпечення вогнестійкості, та приймати ефективні рішення щодо підвищення вогнестійкості залізобетонних конструкцій. Встановлено, що результати чисельного моделювання за допомогою розроблених комп'ютерних моделей є адекватними щодо оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій, оскільки середньоквадратичне відхилення розрахункових температур від експериментальних результатів не перевищує похибку в 9 %.

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

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

протипожежного заходу, втрати від пожежі в паркінгу для автомобілів можливо зменшити у 15 разів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Серант А. Й., Соха Ю. І. (2012). Особливості і принципи формування системи державного управління природно-техногенною безпекою. *Ефективність державного управління*, 32, 457–465.
2. Круковский П.Г., Новак С.В., Поклонский В.Г., Еременко С.А., Фролов Г.А. Оценка огнестойкости металлических строительных конструкций и огнезащитной способности покрытий (расчетно-экспериментальный подход): коллективная монография. Киев: Франко Пак, 2021. 148с.
3. Brushlinsky, N. N., Sokolov, S. V., Wagner, P. & Messerschmidt, B. (2022). World fire statistics. *Center of fire statistics. – 2022. – Report*, 27. (2022). https://www.ctif.org/sites/default/files/2022-08/CTIF_Report27_ESG_0.pdf.
4. Lim, J. W., Baalisampang, T., Garaniya, V., Abbassi, R., Khan, F., & Ji, J. (2019). Numerical analysis of performances of passive fire protections in processing facilities. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 62. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.103970>.
5. Paz, I., Paz, R. M., Fernández, E., & Diez, J. J. (2014). Human factor in resilience systems. In *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 7: Education, Professional Ethics and Public Recognition of Engineering Geology* (pp. 157–160). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09303-1_30.
6. Knorr, W., Dentener, F., Lamarque, J. F., Jiang, L., & Arneth, A. (2017). Wildfire air pollution hazard during the 21st century. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(14), 9223–9236. <https://doi.org/10.5194/acp-17-9223-2017>.
7. Kustov, M., Kalugin, V., Tutunik, V., Tarakhno, O. (2019). Physicochemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemical pollution of the atmosphere. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 1, 92–99.
8. Re, V. (2019). Shedding light on the invisible: addressing the potential for groundwater contamination by plastic microfibers. *Hydrogeology Journal*, 27(7),

2719–2727. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-01998-x>.

9. Dadashov, I., Loboichenko, V., Kireev, A. (2018). Analysis of the ecological characteristics of environment friendly fire fighting chemicals used in extinguishing oil products. *Pollution Research*, 37, 1, 63–77.

10. Mygalenko, K., Nuyanzin, V., Zemlianskyi, A., Dominik, A., Pozdieiev, S. (2018). Development of the technique for restricting the propagation of fire in natural peat ecosystems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1, 10/91, 31–37.

11. Popov, O., Iatsyshyn, A., Kovach, V., Artemchuk, V., Taraduda, D., Sobyna, V., Sokolov, D., Dement, M., Yatsyshyn, T., Matvieieva, I. (2019). Analysis of possible causes of NPP emergencies to minimize risk of their occurrence. *Nuclear and Radiation Safety*, 1, 81, 75–80.

12. Краснов В. О., Носовський А. В., Рудько В. М., Щербін В. М. (2016). Об'єкт «Укриття»: 30 років після аварії. НАН України, Ін-т проблем безпеки АЕС, 512 с. ISBN 978-966-02-7875-2.

13. Pospelov B., Rybka E., Meleshchenko R., Krainiukov O., Harbuz S., Bezuhla Yu., Morozov I., Kuruch A., Saliyenko O., Vasylchenko R. (2020). Use of uncertainty function for identification of hazardous states of atmospheric pollution vector. *Eastern-European Journal of Enterprise*, 2/10 (104), 6–12.

14. Sadkovyi V., Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Krainiukov O., Rud A., Karpets K., Bezuhla Yu. (2020). Construction of a method for detecting arbitrary hazard pollutants in the atmospheric air based on the structural function of the current pollutant concentrations. *Eastern-European Journal of Enterprise*, 6/10 (108), 14–22.

15. Alis, B.; Yazici, C.; Özkal, F. M. (2022). Investigation of fire effects on reinforced concrete members via finite element analysis. *ACS Omega*, 7, 26881–26893.

16. Song, Q.-Y., Han, L.-H., Zhou, K., Feng, Y. (2018). Temperature distribution of CFST columns protected by intumescent fire coating. Ninth International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS'2018). doi: <https://doi.org/10.18057/icass2018.p.164>.

17. Yan, X., & Gernay, T. (2022). Local buckling of cold-formed high-strength steel hollow section columns at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107403>.
18. Otrosh, Yu., Semkiv, O., Rybka, E., Kovalov, A. (2019). About need of calculations for the steel framework building in temperature influences conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708, 1, 012065.
19. Both, I., Wald, F., & Zaharia, R. (2016). Benchmark for numerical analysis of steel and composite floors exposed to fire using a general purpose FEM code. *Journal of Applied Engineering Science*, 14(2), 275–284. <https://doi.org/10.5937/jaes14-8664>.
20. Жартовський С.В. (2018). Технічні методи аудиту пожежної безпеки об'єктів з пожежною навантагою із дерев'яних будівельних конструкцій. *Науковий вісник НЛТУ України*, (28.1), 85-90.
21. Kültür, Ö. F., Al-Masri, A., & Sayin, B. (2022). Effect of high temperature exposure on design parameters and collapse behavior of reinforced concrete and steel-framed buildings. *Case Studies in Construction Materials*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01263>.
22. Cvetkovska, M., Knezevic, M., Xu, Q., Chifliganec, C., Lazarevska, M., & Gavriloska, A. T. (2018). Fire scenario influence on fire resistance of reinforced concrete frame structure. In *Procedia Engineering* (Vol. 211, pp. 28–35). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.134>.
23. Panchenko, A., Voloshina, A., Boltyansky, O., Milaeva, I., Grechka, I., Khovansky, S., Svyntarenko, M., Glibko, O., Maksimova, M., Paranyak, N. (2018). Designing the flow-through parts of distribution systems for the PRG series planetary hydraulic motors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3, 1/93, 67–77.
24. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Popov, V., Romin, A. (2018). Experimental study of the fluctuations of gas medium parameters as early signs of fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1, 10/91, 50–55.

25. Vambol, S., Vambol, V., Bogdanov, I., Suchikova, Y., Rashkevich, N. (2017). Research of the influence of decomposition of wastes of polymers with nano inclusions on the atmosphere. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6, 10/90, 57–64.
26. Danchenko, Y., Andronov, V., Teslenko, M., Permiakov, V., Rybka, E., Meleshchenko, R., Kosse, A. (2018). Study of the free surface energy of epoxy composites using an automated measurement system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1, 12/91, 9–17.
27. Otrosh, Y., Rybka, Y., Danilin, O., Zhuravskiy, M. (2019). Assessment of the technical state and the possibility of its control for the further safe operation of building structures of mining facilities. *E3S Web of Conferences*, 123, 01012.
28. Andronov, V., Pospelov, B., Rybka, E., Skliarov, S. (2017). Examining the learning fire detectors under real conditions of application. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3, 9–87, 53–59.
29. Altunişik, A. C., Akbulut, Y. E., Başağa, H. B., Mostofi, S., Mosallam, A., & Wafa, L. F. (2022). Experimental Investigation on Dynamic Characteristics Changes of Fire Exposed Reinforced Concrete and Steel Members. *Fire Technology*, 58(3), 1169–1208. <https://doi.org/10.1007/s10694-021-01189-9>.
30. Shah, A. H., & Sharma, U. K. (2017). Fire resistance and spalling performance of confined concrete columns. *Construction and Building Materials*, 156, 161–174. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.167>.
31. Andronov, V., Pospelov, B., Rybka, E. (2017). Development of a method to improve the performance speed of maximal fire detectors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2, 9/86, 32–37.
32. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Skliarov, S. (2017). Research into dynamics of setting the threshold and a probability of ignition detection by selfadjusting fire detectors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5, 9/89, 43–48.
33. Ma, X., Pan, J., Cai, J., Zhang, Z., & Han, J. (2022, January 10). A review on cement-based materials used in steel structures as fireproof coating. *Construction*

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125623>.

34. Kashi, E., & Bahoosh, M. (2020). Jet fire assessment in complex environments using computational fluid dynamics. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 37(1), 203–212. <https://doi.org/10.1007/s43153-019-00003-y>.

35. Абрамов Ю.А., Рыбка Е.А. & Гвоздь В.М. (2013). Термический комплекс для испытаний образцов строительных конструкций. Харьков: НУГЗУ, 128.

36. Технічний регламент будівельних виробів, будівель і споруд, затверджений Постановою КМУ від 20.12.2006 № 1764/ПС «Законодавство» станом на 26.12.2006. – С.6.

37. Vambol, S., Vambol, V., Bogdanov, I., Suchikova, Y., & Rashkevich, N. (2017). Research of the influence of decomposition of wastes of polymers with nano inclusions on the atmosphere. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(10–90), 57–64. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118213>.

38. Kustov, M. V., Kalugin, V. D., Tutunik, V. V., & Tarakhno, O. V. (2019). Physicochemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemical pollution of the atmosphere. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, (1), 92–99. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99>.

39. Dubinin, D., Avetisyan, V., Ostapov, K., Shevchenko, S., Hovalenkov, S., Beliuchenko, D., ... Cherkashyn, O. (2020). Investigation of the effect of carbon monoxide on people in case of fire in a building. *Sigurnost*, 62(4), 347–357. <https://doi.org/10.31306/s.62.4.2>.

40. Otrosh, Y., Kovalov, A., Semkiv, O., Rudeshko, I., & Diven, V. (2018). Methodology remaining lifetime determination of the building structures. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 230). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201823002023>.

41. Yurii, O., Surianinov, M., Alexander, G., & Olena, S. (2019). Experimental and computer researches of ferroconcrete beams at high-temperature

influences. *Materials Science Forum*, 968, 355–360.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.355>.

42. Беликов А. С., Шаломов В. А., Рагимов С. Ю., Удянский Н. Н. (2013). Повышение пожарной безопасности за счет применения вспучивающихся огнезащитных композиций. *Проблемы пожарной безопасности*, (34), 30–39.

43. Popov, O., Iatsyshyn, A., Kovach, V., Artemchuk, V., Kameneva, I., Taraduda, D., ... Yatsyshyn, T. (2020). Risk assessment for the population of Kyiv, Ukraine as a result of atmospheric air pollution. *Journal of Health and Pollution*, 10(25), 1–11. <https://doi.org/10.5696/2156-9614-10.25.200303>.

44. Popov, O., Iatsyshyn, A., Kovach, V., Artemchuk, V., Taraduda, D., Sobyna, V., ... Dimitriieva, D. (2019). Physical features of pollutants spread in the air during the emergency at NPPs. *Nuclear and Radiation Safety*, 4(84). [https://doi.org/10.32918/NRS.2019.4\(84\).11](https://doi.org/10.32918/NRS.2019.4(84).11).

45. Новак, С. В., Нефедченко, Л. М., & Абрамов, О. О. (2010). Методи випробувань будівельних конструкцій та виробів на вогнестійкість. *Новак СВ, Нефедченко ЛМ, Абрамов ОО–Київ: Пожінформтехніка*.

46. Bashynska, O., Otrosh, Y., Holodnov, O., Tomashevskyi, A., & Venzhego, G. (2020). Methodology for calculating the technical state of a reinforced-concrete fragment in a building influenced by high temperature. In *Materials Science Forum* (Vol. 1006 MSF, pp. 166–172). Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.166>.

47. Kovalov, A., Otrosh, Y., Rybka, E., Kovalevska, T., Togobytska, V., & Rolin, I. (2020). Treatment of determination method for strength characteristics of reinforcing steel by using thread cutting method after temperature influence. In *Materials Science Forum* (Vol. 1006 MSF, pp. 179–184). Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.179>.

48. Pozdieiev, S., Nuianzin, O., Sidnei, S., & Shchipets, S. (2017). Computational study of bearing walls fire resistance tests efficiency using different combustion furnaces configurations. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 116). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201711602027>.

49. Nuianzin, O., Pozdieiev, S., Hora, V., Shvydenko, A., & Samchenko, T. (2018). Experimental study of temperature mode of a fire in a cable tunnel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(10–93), 21–27. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131792>.
50. Отрош, Ю. А., Поклонський, В. Г., Фесенко, О. А., Тарасюк, В. Г., Немчинов, Ю. І., Байтала, Х. З., ... & Калафат, К. В. (2016). Розрахунок залізобетонних конструкцій на вогнестійкість відповідно до Єврокоду 2. Практичний посібник.
51. Fomyn, S. L., Plakhotnykova, Y. A., & Parafenko, A. A. (2016). Calculation of fire concrete floor slabs refining and simplified method. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu*, 161, 145–157.
52. Vasilchenko, A., Doronin, E., Chernenko, O., & Ponomarenko, I. (2019). Estimation of fire resistance of bending reinforced concrete elements based on concrete with disperse fibers. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 708). IOP Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012075>.
53. Surianinov, M., Andronov, V., Otrosh, Y., Makovkina, T., & Vasiukov, S. (2020). Concrete and fiber concrete impact strength. In *Materials Science Forum* (Vol. 1006 MSF, pp. 101–106). Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.101>
54. Pozdieiev, S., Nekora, O., Kryshstal, T., Zazhoma, V., & Sidnei, S. (2018). Method of the calculated estimation of the possibility of progressive destruction of buildings in result of fire. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 230). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002026>.
55. Nekora, O., Slovynsky, V., & Pozdieiev, S. (2017). The research of bearing capacity of reinforced concrete beam with use combined experimental-computational method. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 116). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711602024..>

56. Jiangtao, Y., Yichao, W., Kexu, H., Kequan, Y., & Jianzhuang, X. (2017). The performance of near-surface mounted CFRP strengthened RC beam in fire. *Fire Safety Journal*, 90, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.04.031>.

57. Ройтман, В. М., & Габдулин, Р. Ш. (2013). Обеспечение стойкости железобетонных конструкций против взрывообразного разрушения при пожаре с помощью тонкослойных огнезащитных вспучивающихся покрытий. *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*, (2), 11–16.

58. Takla, M., & Tarsha, I. (2020). Effect of temperature on carrying capacity of concrete columns confined with multi-layers of CFRP. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 14(1), 14–26.

59. Du, P., Yang, Y., & Tan, K. H. (2021). Analytical modelling of high strength concrete columns under ambient and fire conditions. *Engineering Structures*, 247. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113216>.

60. Alexey, V., Evgeny, D., Boris, I., & Vladimir, K. (2019). Effect of residual deformation of a steel column on its fire resistance under combined exposure "explosion-fire". In *Materials Science Forum* (Vol. 968 MSF, pp. 288–293). Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.288>.

61. Buch, S. H., & Sharma, U. K. (2019). Empirical model for determining fire resistance of Reinforced Concrete columns. *Construction and Building Materials*, 225, 838–852. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.183>.

62. Buttignol, T. E. T., & Bittencourt, T. N. (2021). Simplified design procedures for the structural analysis of reinforced concrete columns in fire. *Engineering Structures*, 246. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113076>.

63. Xue, C. (2020). Research on steel structure technology in civil engineering construction. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 474). Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/474/7/072072>.

64. 钟波. (2020). Development and Application of Fireproof Coatings for Fabricated Steel Structures. *Material Sciences*, 10(12), 1027–1033. <https://doi.org/10.12677/ms.2020.1012121>.

65. Zhu, Y. Y., Zhao, D. L., He, Q., Zhang, J. X., Li, L. Y., & Ma, D. D. (2014). Preparation and property of MCMB fireproof coating for steel structure. *Gongneng Cailiao/Journal of Functional Materials*, 45(3), 03145–03148. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-9731.2014.03.032>.

66. Qing Xu, Guo-Qiang Li, Yong C. Wang, Luke Bisby (2020). An experimental study of the behavior of intumescent coatings under localized fires. *Fire Safety Journal*, 115, 103003.

67. de Silva, D., Bilotta, A., & Nigro, E. (2020). Approach for modelling thermal properties of intumescent coating applied on steel members. *Fire Safety Journal*, 116. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103200>.

68. Morys, M., Häßler, D., Krüger, S., ScharTEL, B., & Hothan, S. (2020). Beyond the standard time-temperature curve: Assessment of intumescent coatings under standard and deviant temperature curves. *Fire Safety Journal*, 112. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.102951>.

69. Bychkov, A. S., & Kondratiev, A. V. (2019). Criterion-Based Assessment of Performance Improvement for Aircraft Structural Parts with Thermal Spray Coatings. *Journal of Superhard Materials*, 41(1), 53–59. <https://doi.org/10.3103/S1063457619010088>.

70. Wang, L., Chen, B., Zhang, C., & Li, G. (2019). Experimental study on insulative properties of intumescent coating exposed to standard and nonstandard furnace curves. *Fire and Materials*, 43(7), 782–793. <https://doi.org/10.1002/fam.2737>.

71. R. Maciulaitis, M. Grigonis, J. Malaiskiene (2018). The impact of the aging of intumescent fire protective coatings on fire resistance. *Fire Safety Journal*, 98, 15–23.

72. Tian, N., Delichatsios, M. A., Zhang, J., & Fateh, T. (2018). A methodology and a simple engineering fire performance model for Intumescent Fire Retardant

coatings. *Fire Safety Journal*, 98, 120–129.

<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.04.010>.

73. Pozdieiev, S., Nuianzin, O., Borsuk, O., & Nedilko, I. (2021). Research of integrity of fire insulation cladding with mineral wool of steel beam under fire impact. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1021). IOP Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012024>.

74. Dreyer, J. A. H., Weinell, C. E., Dam-Johansen, K., & Kiil, S. (2021, May 1). Review of heat exposure equipment and in-situ characterisation techniques for intumescent coatings. *Fire Safety Journal*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103264>.

75. Lucherini, A., Giuliani, L., & Jomaas, G. (2018). Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions. *Fire Safety Journal*, 95, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.10.004>.

76. Naser, M. Z., & Çiftçioğlu, A. Ö. (2023). Causal discovery and inference for evaluating fire resistance of structural members through causal learning and domain knowledge. *Structural Concrete*. <https://doi.org/10.1002/suco.202200525>.

77. de Souza, R. C. S., Andreini, M., La Mendola, S., Zehfuß, J., & Knaust, C. (2019). Probabilistic thermo-mechanical finite element analysis for the fire resistance of reinforced concrete structures. *Fire Safety Journal*, 104, 22–33. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.12.005>.

78. Расторгуев, Б. С., Плотников, А., & Хуснутдинов, Д. З. (2007). Проектирование зданий и сооружений при аварийных взрывных воздействиях.

79. Першаков, В. М., Барабаш, М. С., Белятинський, А. О., & Лисницька, К. М. (2015). Проблеми протидії конструкцій прогресуючому обваленню будівель та споруд.

80. Manco Rivera, M. R., Vaz, M. A., Cyrino, J. C. R., & Landesmann, A. (2021). A study on the use of fireproof protection in offshore topside steel structures subject to localised fires. *Marine Systems and Ocean Technology*, 16(2), 55–68. <https://doi.org/10.1007/s40868-021-00102-x>.

81. Bolina, F. L., Prager, G. L., Rodrigues, E., & Tutikian, B. F. (2015). Avaliação da resistência ao fogo de paredes maciças de concreto armado TT - Evaluation of fire resistance of massive reinforced concrete walls. *Ambiente Construído*, 15(4), 291–305.

82. Lucherini, A., & Maluk, C. (2019). Assessing the onset of swelling for thin intumescent coatings under a range of heating conditions. *Fire Safety Journal*, 106, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.03.014>.

83. Zeng, Y., Weinell, C. E., Dam-Johansen, K., Ring, L., & Kiil, S. (2020). Comparison of an industrial- and a laboratory-scale furnace for analysis of hydrocarbon intumescent coating performance. *Journal of Fire Sciences*, 38(3), 309–329. <https://doi.org/10.1177/0734904120902852>.

84. Price, E. J., Covello, J., Tuchler, A., & Wnek, G. E. (2020). Intumescent, Epoxy-Based Flame-Retardant Coatings Based on Poly(acrylic acid) Compositions. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 12(16), 18997–19005. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c00567>.

85. Vakhitova, L., Drizhd, V., Taran, N., Kalafat, K., & Bessarabov, V. (2016). The effect of organoclays on the fire-proof efficiency of intumescent coatings. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, (6 (10)), 10–16.

86. Cirpici, B. K., Wang, Y. C., & Rogers, B. (2016). Assessment of the thermal conductivity of intumescent coatings in fire. *Fire Safety Journal*, 81, 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.01.011>.

87. Gillet, M., Perez, L., & Autrique, L. (2019). A model based predictive tool for fire safety intumescent coatings design. *Fire Safety Journal*, 110. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102908>.

88. Новак, С. В., Дріжд, В. Л., & Добростан, О. В. (2018). Аналіз сучасних європейських методів оцінювання вогнезахисної здатності вогнезахисних матеріалів для будівельних конструкцій. *Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека*, (1), 74–85.

89. Michel, M. A., Tutikian, B. F., Ortolan, V., Oliveira, M. L. S., Sampaio, C. H., Gómez P, L., & Silva, L. F. O. (2019). Fire resistance performance of concrete-

PVC panels with polyvinyl chloride (PVC) stay in place (SIP) formwork. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5), 4094–4107. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.07.018>.

90. Michel Murillo, A., Valery Abisambra, G., Aura Acosta, P., Claudia Quesada, Q., Tutikian, B. F., & Ehrenbring, H. Z. (2021). Comparison of the fire resistance behaviour of structural insulated panels with expanded polystyrene core treated with intumescent coating. *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 1958–1969. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.079>.

91. Zhang, T., Zhang, Y., Xiao, Z., Yang, Z., Zhu, H., Ju, J. W., & Yan, Z. (2019). Development of a novel bio-inspired cement-based composite material to improve the fire resistance of engineering structures. *Construction and Building Materials*, 225, 99–111. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.121>.

92. Beh, J. H., Yew, M. C., & Saw, L. H. (2020). Development of lightweight fire resistant sandwich panel. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 476). Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/476/1/012031>.

93. Shepel, S. V., Wakili, K. G., & Hugi, E. (2012). Investigation of heat transfer in gypsum plasterboard exposed to fire for three nominal fire scenarios. *Journal of Fire Sciences*, 30(3), 240–255. <https://doi.org/10.1177/0734904111433265>.

94. Medri, V., Papa, E., Mazzocchi, M., Laghi, L., Morganti, M., Francisconi, J., & Landi, E. (2015). Production and characterization of lightweight vermiculite/geopolymer-based panels. *Materials and Design*, 85, 266–274. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.145>.

95. Гуліда, Е. М., & Ренкас, А. А. (2012). Вогнестійкість залізобетонних плит перекриття житлових та адміністративних будівель. *Проблеми пожежної безпеки: Сб. науч. тр.*, (32), 62–73.

96. Ali Kazmi, M., Hassan Askari, G., Ali Nasir, M., Asim Pasha, R., & Parveen, A. Fabrication of Intumescent Fire-Retardant Coating for Structural Applications. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 381, p. 02001). EDP Sciences.

97. Chernukha, A., Teslenko, A., Kovaliov, P., & Bezuglov, O. (2020). Mathematical modeling of fire-proof efficiency of coatings based on silicate composition. In *Materials Science Forum* (Vol. 1006 MSF, pp. 70–75). Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.70>.

98. Нувліуд М., Башинський О., & Пешко М. (2018). Дослідження умов формування вогнезахисного покриття та його вплив на термічні і деформаційні властивості залізобетону. *Пожарна безпека*, 26, 31-37. Retrieved із <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/269>.

99. Carlos, T. B., Rodrigues, J. P. C., de Lima, R. C. A., & Dhima, D. (2018). Experimental analysis on flexural behaviour of RC beams strengthened with CFRP laminates and under fire conditions. *Composite Structures*, 189, 516–528. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.094>.

100. Puri, R. G., & Khanna, A. S. (2017). Intumescent coatings: A review on recent progress. *Journal of Coatings Technology and Research*, 14(1). <https://doi.org/10.1007/s11998-016-9815-3>.

101. Xu, Q., Li, G. Q., Jiang, J., & Wang, Y. C. (2018). Experimental study of the influence of topcoat on insulation performance of intumescent coatings for steel structures. *Fire Safety Journal*, 101, 25–38. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.08.006>.

102. Zoleta, J. B., Itao, G. B., Resabal, V. J. T., Lubguban, A. A., Corpuz, R. D., Ito, M., ... Tabelin, C. B. (2020). Improved pyrolysis behavior of ammonium polyphosphate-melamine-expandable (APP-MEL-EG) intumescent fire retardant coating system using ceria and dolomite as additives for I-beam steel application. *Heliyon*, 6(1). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03119>.

103. Hao, J., & Chow, W. K. (2003). A brief review of intumescent fire retardant coatings. *Architectural Science Review*, 46(1), 89-95.

104. Голоднов, О. І., Антошина, Т. В., & Отрош, Ю. А. (2017). Про необхідність розрахунку будівель зі сталевим каркасом на температурні впливи. *Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені ВМ Шимановського*, (20), 65–84.

105. Đỗ, T. (2023). Development of an epoxy-based intumescent retardant coatings comprising of different fillers for steel structure. *Journal of Military Science and Technology*, 87, 70-77.
106. Imran, M., Liew, M. S., Nasif, M. S., Niazi, U. M., & Yasreen, A. (2017). Hazard assessment studies on hydrocarbon fire and blast: An overview. *Advanced Science Letters*, 23(2), 1243–1247. <https://doi.org/10.1166/asl.2017.8349>.
107. Hawileh, R. A., & Kodur, V. K. R. (2018). Performance of reinforced concrete slabs under hydrocarbon fire exposure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 77, 177–187.
108. Cirpici, B. K. (2020). Design analysis of a steel industrial building with wide openings exposed to fire. *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 6(3), 99. <https://doi.org/10.20528/cjsmec.2020.03.001>.
109. Новак, С. В., Якименко, О. П. (2009). Особливості оцінювання вогнестійкості залізобетонних конструкцій опор тунельних споруд з вогнезахисним покриттям. *Науковий вісник УкрНДППБ*, 1(19), 49 – 55.
110. Wang, L., Wang, Y., & Zeng, W. (2021). An experimental study on crack and debonding of intumescent coatings and their effects on temperature development of steel elements. *Fire Safety Journal*, 122. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103325>.
111. L.L. Wang, Y.C. Wang, G.Q. Li, Q.Q. Zhang (2020). An experimental study of the effects of topcoat on aging and fire protection properties of intumescent coatings for steel elements. *Fire Safety Journal*, 111, 102931.
112. Ямщикова, С. А. (2009). *Повышение огнезащитной способности вспучивающихся покрытий для объектов нефтегазовой отрасли* (Doctoral dissertation, Уфимский государственный нефтяной технический университет).
113. Вахітова, Л. М., Таран, Н. А., Бессарабов, В. І., Дріжд, В. Л., Придятько, С. П., & Прудченко, А. П. (2018). Розроблення вогнезахисного покриття для умов вуглеводневої пожежі з покращеними реологічними характеристиками. *Вісті Донецького гірничого інституту*, (1), 103–115.

114. Mahmud, H. M. I., Mandal, A., Nag, S., & Moinuddin, K. A. M. (2021). Performance of fire protective coatings on structural steel member exposed to high temperature. *Journal of Structural Fire Engineering*, 12(2), 193–211. <https://doi.org/10.1108/JSFE-07-2020-0025>.
115. Wang, Y. C., & Zhao, J. P. (2019). Facile preparation of slag or fly ash geopolymer composite coatings with flame resistance. *Construction and Building Materials*, 203, 655–661. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.097>.
116. Carlos, C. H., Mauro, M. R., F. Baldissera, A., & Ferreira, C. A. (2019). A new benzoxazine-based intumescent coating for passive protection against fire. *Progress in Organic Coatings*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105321>.
117. Inerhunwa, I., Wang, Y. C., & Su, M. (2019). Reliability analysis of intumescent coating protected steel members under the standard fire condition. *Fire Safety Journal*, 104, 43–56. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.12.003>.
118. de Silva, V. P. (2005). Determination of the steel fire protection material thickness by an analytical process—a simple derivation. *Engineering Structures*, 27(14), 2036–2043.
119. Pul, S., Atasoy, A., Senturk, M., & Hajirasouliha, I. (2021). Structural performance of reinforced concrete columns subjected to high-temperature and axial loading under different heating-cooling scenarios. *Journal of Building Engineering*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102477>.
120. ENV 13381-4: 2002 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members - Part 4: Applied protection to steel members (Методи випробування для визначення здатності підвищувати вогнестійкість будівельних конструкцій – Частина 4: Захист, що використовується для сталевих конструкцій).
121. Alcaíno, P., Santa-María, H., Magna-Verdugo, C., & López, L. (2020). Experimental fast-assessment of post-fire residual strength of reinforced concrete frame buildings based on non-destructive tests. *Construction and Building Materials*, 234. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117371>.

122. Nair, A., & Salem, O. (Sam). (2020). Experimental determination of the residual compressive strength of concrete columns subjected to different fire durations and load ratios. *Journal of Structural Fire Engineering*, 11(4), 529–543. <https://doi.org/10.1108/JSFE-10-2019-0034>.

123. Kuehnen, R., Youssef, M., & El-Fitiany, S. (2021). Performance-based design of RC beams using an equivalent standard fire. *Journal of Structural Fire Engineering*, 12(1), 98–109. <https://doi.org/10.1108/JSFE-02-2020-0008>.

124. Song, T., & Bai, L. L. (2012). Failure analysis of reinforced concrete columns after high temperature. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 157, pp. 1578-1581). Trans Tech Publications Ltd.

125. Novak, S., Drizhd, V., Dobrostan, O., & Maladyka, L. (2019). Influence of testing samples' parameters on the results of evaluating the fireprotective capability of materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10–98), 35–42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.164743>.

126. de Silva, D., Bilotta, A., & Nigro, E. (2019). Experimental investigation on steel elements protected with intumescent coating. *Construction and Building Materials*, 205, 232–244. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.223>.

127. Nadjai, A., Petrou, K., Han, S., & Ali, F. (2016). Performance of unprotected and protected cellular beams in fire conditions. *Construction and Building Materials*, 105, 579–588. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.150>.

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

129. Новак, С. В., Круковський, П. Г., & Перепилиця, М. С. (2016). Визначення розподілу температури у сталевих конструкціях в умовах вогневого впливу розрахунковими методами. *Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека*, (1), 9-15.

130. Lakhani, H., Kamath, P., Bhargava, P., Sharma, U. K., & Reddy, G. R. (2013). Thermal analysis of reinforced concrete structural elements. *Journal of*

Structural Fire Engineering, 4(4), 227–243. <https://doi.org/10.1260/2040-2317.4.4.227>.

131. Garlińska, U., Michalak, P., & Popielarczyk, T. (2015). Szacowanie możliwości utraty nośności konstrukcji budowlanej w warunkach pożaru. *BITP*, (39, Issue 3), 59-66.

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

133. de Silva, D., Alam, N., Nadjai, A., Nigro, E., & Ali, F. (2021). Finite element modelling for structural performance of slim floors in fire and influence of protection materials. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(23). <https://doi.org/10.3390/app112311291>.

134. Голоднов, А. И., Кудряшов, В. А., Полевода, И. И., Отрош, Ю. А., Ткачук, И. А., Семиног, Н. Н., & Дробыш, А. С. (2015). Сопоставительная оценка огнестойкости железобетонных многопустотных плит с использованием стандартов Беларуси, Украины, Европейского Союза, а также расчетных методов. *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*, (1 (21)).

135. Džolev, I., Cvetkovska, M., Radonjanin, V., Lađinović, Đ., & Laban, M. Modelling approach of structural fire performance. In *book of proceedings* (Vol. 17).

136. Поздєєв, С. В., Отрош, Ю. А., Демешок, В. В., & Федченко, І. В. (2016). Розрахунковий метод оцінки вогнестійкості плити перекриття. *Промислове будівництво та інженерні споруди*, (2), 28–33.

137. Поздєєв, С. В., Отрош, Ю. А., Омельченко, А. М., & Кропива, М. О. (2015). Метод інтерпретації температурних полів у перерізі залізобетонних балок. *Збірник наукових праць [Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка]. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво*, (2), 70–78.

138. Поздеев С.В. (2011). Верификация результатов уточненного расчетного метода определения пределов огнестойкости железобетонных конструкций. *Проблемы пожарной безопасности*, (29), 141–148.

139. Alos-Moya, J., Paya-Zaforteza, I., Garlock, M. E. M., Loma-Ossorio, E., Schiffner, D., & Hospitaler, A. (2014). Analysis of a bridge failure due to fire using computational fluid dynamics and finite element models. *Engineering Structures*, 68, 96–110.

140. Džolev, I., Radujković, A., Cvetkovska, M., Lađinović, Đ., & Radonjanin, V. (2016, April). Fire analysis of a simply supported steel beam using Opensees and Ansys Workbench. In *4th International Conference Contemporary Achievements in Civil Engineering, Subotica* (Vol. 22, pp. 315–322).

141. Li, G. Q., Han, J., Lou, G. B., & Wang, Y. C. (2016). Predicting intumescent coating protected steel temperature in fire using constant thermal conductivity. *Thin-Walled Structures*, 98, 177–184.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.03.008>.

142. Łukomski, M., Turkowski, P., Roszkowski, P., & Papis, B. (2017). Fire Resistance of Unprotected Steel Beams-Comparison between Fire Tests and Calculation Models. In *Procedia Engineering* (Vol. 172, pp. 665–672). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.078>.

143. Абрамов Ю.А., Рыбка Е.А. & Гвоздь В.М. (2013). Термический комплекс для испытаний образцов строительных конструкций.

144. Lin, S., Huang, Z., & Fan, M. (2015). The effects of protected beams and their connections on the fire resistance of composite buildings. *Fire Safety Journal*, 78, 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2015.08.003>.

145. Lazarevska, M., Cvetkovska, M., Knezevic, M., Trombeva Gavriloska, A., Milanovic, M., Murgul, V., & Vatin, N. (2014). Neural network prognostic model for predicting the fire resistance of eccentrically loaded RC columns. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 627, pp. 276–282). Trans Tech Publications Ltd.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.627.276>.

146. Zhang, X., Xiao, Y., & Kunnath, S. K. (2015). State of the art and prospect of research on fire resistance behavior of reinforced concrete columns. *Journal of Natural Disasters*, 24(3), 120–131. <https://doi.org/10.13577/j.jnd.2015.0316>.

147. EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design (Єврокод 2: Проектування залізобетонних конструкцій – Частина 1-2: Загальні положення – Розрахунок конструкцій на вогнестійкість).

148. EN 1363-2: 1999 Fire resistance tests – Part 2: Alternative and additional procedures (Випробування на вогнестійкість. Частина 2: Альтернативні та додаткові процедури).

149. Ng, Y. H., Zope, I. S., Dasari, A., & Tan, K. H. (2020). Correlating the Performance of a Fire-Retardant Coating across Different Scales of Testing. *Polymers*, 12(10), 2271.

150. Paik, J. K., & Czujko, J. (2013). Engineering and design disciplines associated with management of hydrocarbon explosion and fire risks in offshore oil and gas Facilities. In *Transactions - Society of Naval Architects and Marine Engineers* (Vol. 120, pp. 167–197). <https://doi.org/10.5957/smc-2012-a24>.

151. Paik, J. K., & Czujko, J. (2016). Assessment of hydrocarbon explosion and fire risks in offshore installations: Recent advances and future trends. *IES Journal Part A: Civil and Structural Engineering* (Vol. 4. Pp. 167–179).

152. Gravit, M., Gumerova, E., Bardin, A., & Lukinov, V. (2018). Increase of Fire Resistance Limits of Building Structures of Oil-and-Gas Complex Under Hydrocarbon Fire. In *Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 692, pp. 818–829). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1_87.

153. Imran, M., Liew, M. S., Nasif, M. S., Niazi, U. M., & Yasreen, A. (2017). Hazard assessment studies on hydrocarbon fire and blast: An overview. *Advanced Science Letters*, 23(2), 1243–1247. <https://doi.org/10.1166/asl.2017.8349>.

154. Zárate, L. G., Lara, H. E., Cordero, M. E., & Kozanoglu, B. (2014). Infrared thermography and CFD analysis of hydrocarbon jet fires. *Chemical*

<https://doi.org/10.3303/CET1439227>.

155. Paik, J. K., Kim, B. J., Jeong, J. S., Kim, S. H., Jang, Y. S., Kim, G. S., ... Czujko, J. (2010). CFD simulations of gas explosion and fire actions. *Ships and Offshore Structures*, 5(1), 3–12. <https://doi.org/10.1080/17445300902872028>.

156. Uribe, S., Zárate, L., Suo-Anttila, A., Cordero, M. E., & Smith, J. D. (2020). Improvement in the prediction of gasoline pool fire behaviour: CFD modelling and validation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 68. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104317>.

157. Payá-Zaforteza, I., & Garlock, M. E. M. (2010). A 3D numerical analysis of a typical steel highway overpass bridge under a hydrocarbon fire. In *Structures in Fire - Proceedings of the Sixth International Conference, SiF'10* (pp. 11–18).

158. ZVT-Tunnel – Zusatzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Strassentunneln. Tel. 1,2,4. – Ausgabe, 1995 und 2000.

159. Субота, А. В., Семерак, М. М., & Стокалюк, О. В. (2014). Визначення та дослідження температурного поля в елементах металевих конструкцій за умов температурного режиму горіння водню. *Пожезна безпека*, (24), 120-123.

160. Якименко О.П. Підвищення вогнестійкості залізобетонних оправ тунельних споруд : дис. ... кандидата техн. наук : 21.06.02 / Якименко Олена Пилипівна. – К., 2012. – 141 с.

161. Еналеев, Р. Ш., Теляков, Э. Ш., Тучкова, О. А., Качалкин, А. В., & Осипова, Л. Э. (2010). Огнестойкость элементов строительных конструкций при пожарах в нефтегазовом комплексе. *Бутлеровские сообщения*, 19(3), 66–75.

162. Тучкова, О. А. (2011). Градиентно-температурный критерий огнестойкости бетонных конструкций при пожарах в химической отрасли промышленности.

163. Calabrese, L., Cattani, L., & Vocale, P. (2014). Parameter estimation approach applied to the characterization of an intumescent fire retardant paint. *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, 9(2), 101–116.

164. Zehfuß, J., Sander, L., Schaumann, P., & Weisheim, W. (2018). Thermal material properties of fire protection materials for natural fire scenarios. *Bautechnik*, 95(8), 535–546. <https://doi.org/10.1002/bate.201800033>.

165. Weisheim, W., Schaumann, P., Sander, L., & Zehfuß, J. (2020). Numerical model for the fire protection performance and the design of intumescent coatings on structural steel exposed to natural fires. *Journal of Structural Fire Engineering*, 11(1), 33–50. <https://doi.org/10.1108/JSFE-01-2019-0004>.

166. Xu, Q., Han, C., Wang, Y.C., Li, X., Chen, L., Liu, Q. (2015). Experimental and numerical investigations of fire resistance of continuous high strength steel reinforced concrete T-beams. *Fire Safety Journal*, 78, 142–154.

167. Zheng, W., Hou, X., Wang, Y. (2016). Progress and prospect of fire resistance of reinforced concrete and prestressed concrete structures. *J. Harbin Inst. Technol*, 48, 1–18.

168. Tamrazyan, A.G., Mineev, M.S., Urasheva, A. (2020). Fire Resistance of Reinforced Concrete Corrosion-Damaged Columns of the "Standard" Fire. *In Key Engineering Materials*, 828, 163–169.

169. СТБ 11.03.02-2010 Система стандартів пожежної безпеки.

170. ДСТУ Б ГОСТ 28574:2011 Захист від корозії в будівництві. Конструкції бетонні і залізобетонні. Методи випробувань адгезії захисних покриттів (ГОСТ 28574- 90, IDT).

171. ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація.

172. ETAG № 018-1:2004 Guide for the European technical approval of fire protective products – Part 1: General (Настанови щодо технічного схвалення вогнезахисних матеріалів в Європі – Частина 1: Загальні вимоги).

173. ETAG № 018-2:2013 Guide for the European technical approval of fire protective products – Part 2: Reactive coatings for fire protection of steel elements (Настанови щодо технічного схвалення вогнезахисних матеріалів в Європі – Частина 2: Реактивні вогнезахисні матеріали для захисту сталевих конструкцій).

174. ETAG № 018-3:2013 Guide for the European technical approval of fire protective products – Part 3: Renderings and rendering kits intended for fire resisting applications (Настанови щодо технічного схвалення вогнезахисних матеріалів в Європі – Частина 3: Штукатурка і комплекти, до складу яких вона входить, для забезпечення вогнезахисту).

175. ETAG № 018-4:2011 Guide for the European technical approval of fire protective products – Part 4: Fire protective board, slab and mat products and kits (Настанови щодо технічного схвалення вогнезахисних матеріалів в Європі – Частина 4: Вогнезахисні панелі, плити і мати та комплекти, до складу яких вони входять).

176. Визначення прогнозованого (очікуваного) строку придатності вогнезахисного покриття (просочення) для дерев'яних та металевих конструкцій: методика № 181-2015. – [Дата введення 2014-07-11]. – К.: УкрНДЦЗ, 2014. – 12 с.

177. Jimenez, M., Bellayer, S., Revel, B., Duquesne, S., & Bourbigot, S. (2013). Comprehensive study of the influence of different aging scenarios on the fire protective behavior of an epoxy based intumescent coating. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52(2), 729–743. <https://doi.org/10.1021/ie302137g>.

178. Zybina, O., Gravit, M., & Stein, Y. (2017). Influence of carbon additives on operational properties of the intumescent coatings for the fire protection of building constructions. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 90). Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/90/1/012227>.

179. Ustinov, A., Zybina, O., Tomakhova, A., & Pavlov, S. (2018). The enhancement of operating properties of intumescent fire-protective compositions. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 245). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824511008>.

180. Zubielewicz, M., Langer, E., & Królikowska, A. (2021). Trends in the development of intumescent paints for the protection of steel structures and new

related with them expectations. *Ochrona Przed Korozja*, 64(7), 212–220. <https://doi.org/10.15199/40.2021.7.1>.

181. Wang, L. L., Wang, Y. C., & Li, G. Q. (2013). Experimental study of hydrothermal aging effects on insulative properties of intumescent coating for steel elements. *Fire Safety Journal*, 55, 168–181. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.10.004>.

182. Wang, L. L., Wang, Y. C., Yuan, J. F., & Li, G. Q. (2013). Thermal conductivity of intumescent coating char after accelerated aging. *Fire and Materials*, 37(6), 440–456. <https://doi.org/10.1002/fam.2137>.

183. Wang, J. (2016). The protective effects and aging process of the topcoat of intumescent fire-retardant coatings applied to steel structures. *Journal of Coatings Technology and Research*, 13(1), 143–157. <https://doi.org/10.1007/s11998-015-9733-9>.

184. Roberts, T. A., Shirvill, L. C., Waterton, K., & Buckland, I. (2010). Fire resistance of passive fire protection coatings after long-term weathering. *Process Safety and Environmental Protection*, 88(1), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2009.09.003>.

185. Dong, Y., Wang, G., & Su, Q. (2014). Influence of degree of polymerization of ammonium polyphosphate on anti-aging property of waterborne fire resistive coatings. *Surface and Coatings Technology*, 246, 71–76. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.03.009>.

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

187. Lucherini, A., & Maluk, C. (2019, November 1). Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review. *Journal of Constructional Steel Research*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105712>.

188. Çırpıcı, B. K., Orhan, S. N., & Kotan, T. (2019). Numerical modelling of heat transfer through protected composite structural members. *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 5(3), 96. <https://doi.org/10.20528/cjsmec.2019.03.003>.

189. Lucherini, A., Giuliani, L., & Jomaas, G. (2018). Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions. *Fire Safety Journal*, 95, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.10.004>.
190. Elliott, A., Temple, A., Maluk, C., & Bisby, L. (2014). Novel testing to study the performance of intumescent coatings under non-standard heating regimes. In *Fire Safety Science* (Vol. 11, pp. 652–665). International Association for Fire Safety Science. <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.11-652>.
191. Lucherini, A., & Maluk, C. (2017). Novel test methods for studying the fire performance of thin intumescent coatings. In *Proceedings of 2nd International Fire Safety Symposium (IFireSS), Napoli, Italy* (pp. 565–572).
192. Yazici, C., Mehmet Özkal, F., Nazif Orhan, S., & Kaan Cirpici, B. (2022). Reformative effects of intumescent coating on the structural characteristics of cold-formed steel. *ACS Omega*, 7, 42560–42569.
193. Li, G. Q., Han, J., & Wang, Y. C. (2017). Constant effective thermal conductivity of intumescent coatings: Analysis of experimental results. *Journal of Fire Sciences*, 35(2), 132–155.
194. Kolšek, J., & Češarek, P. (2015). Performance-based fire modelling of intumescent painted steel structures and comparison to EC3. *Journal of Constructional Steel Research*, 104, 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.10.008>.
195. Bozzoli, F., Mocerino, A., Rainieri, S., & Vocale, P. (2018). Inverse heat transfer modeling applied to the estimation of the apparent thermal conductivity of an intumescent fire retardant paint. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 90, 143–152. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.09.006>.
196. Peña D. L., Albero V., Ibáñez C., Hospitaler A. Sectional model for the fire evaluation of reinforced concrete columns subjected to biaxial bending. *Engineering Structures*. 2021. 247. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113094>.

197. Standard for Safety for Rapid Rise Fire Tests of Protection Materials for Structural Steel: ANSI/UL 1709 (2007). URL: <http://pfpsystems.com>.
198. Standard Methods of Fire Endurance Tests of Building Construction and Materials: CAN/ULC-S101-04. URL: <http://pfpsystems.com>.
199. Zhang, Y., Wang, Y. C., Bailey, C. G., & Taylor, A. P. (2013). Global modelling of fire protection performance of an intumescent coating under different furnace fire conditions. *Journal of Fire Sciences*, 31(1), 51–72. <https://doi.org/10.1177/0734904112453566>.
200. Gong, J., Xiang, Q., & Zhao, M. (2015). Laboratory research on composite tunnel fire-retardant coating. *Materials and Manufacturing Processes*, 30(6), 699–705. <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.941872>.
201. Cirpici, B. K., Wang, Y. C., Rogers, B. D., & Bourbigot, S. (2016). A Theoretical model for quantifying expansion of intumescent coating under different heating conditions. *Polymer Engineering and Science*, 56(7), 798–809. <https://doi.org/10.1002/pen.24308>.
204. Малярєнко, В. А., Рєдько, А. Ф., Чайка, Ю. И., & Поволочко, В. Б. (2001). Технічна теплофізика огороджуючих конструкцій будівель та споруд. Навч. Посібник. Х.: «Рубікон».
205. Ковальов, А. І. (2017). Обґрунтування параметрів вогнезахисного штукатурного покриття для захисту залізобетонних перекриттів. *Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека*, (1), 20–27.
206. Круковский, П. Г., Ковалев, А. И., Черненко, К. А., Метель, М. А., & Абрамов, А. А. (2012). Моделирование теплового состояния и огнестойкости многопустотного железобетонного перекрытия. *Пожарная безопасность*, (21), 85–94.
207. Kovalov, A., Otrosh, Y., Ostroverkh, O., Hrushovinchuk, O., & Savchenko, O. (2018). Fire resistance evaluation of reinforced concrete floors with fire-retardant coating by calculation and experimental method. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 60). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000003>.

208. Kovalov, A., Konoval, V., Khmyrova, A., & Dudko, K. (2019). Parameters for simulation of the thermal state and fire-resistant quality of hollow-core floors used in the mining industry. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 123). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301022>.

209. Ковалев, А. И. (2013). Определение характеристики огнезащитной способности покрытий железобетонных перекрытий для различных температурных режимов пожара. *Пожарна безпека: теорія і практика*, (13), 4–9.

210. Ковалев, А. И. (2013). Влияние параметров модели на точность определения теплофизических характеристик огнезащитного покрытия. *Пожарна безпека: теорія і практика*, (14), 64–68.

211. Володарський, Є.Т., Кошева, Л.О. (2008). Статистична обробка даних. *Київ, НАУ*.

212. Антоненко С.В., Бондаренко М.О. Проблема моніторингу забрудненості атмосферного повітря // Датчики, прилади та системи–2021: матеріали ІХ Міжнародної науково-технічної конференції, 20–24 вересня 2021 року, Черкаси – Херсон – Лазурне, 2021. С. 114 – 116.

213. Гальченко, В. Я., Трембовецька, Р. В., & Тичков, В. В. (2018). Застосування нейрокомп'ютинга на етапі побудови метамоделей в процесі оптимального сурогатного синтезу антен. *Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування*, 74, 60–72.

214. Halchenko, V., Trembovetska, R., Tychkov, V., & Storchak, A. V. (2020). The construction of effective multidimensional computer designs of experiments based on a quasi-random additive recursive Rd–sequence. *Applied Computer Systems*, 25(1), 70–76.

215. Halchenko, V., Trembovetska, R., Tychkov, V., & Tychkova, N. (2023). Construction of Quasi-DOE on Sobol's Sequences with Better Uniformity 2D Projections. *Applied Computer Systems*, 28(1), 21–34.

216. Ніжник, В. В. (2020). Розвиток наукових основ оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти: дис.... доктора техн. наук: 21.06. 02/Ніжник Вадим Васильович.

217. Ковалев, А.И., Круковский, П.Г., & Качкар, Е.В. (2012). Определение характеристик вспучивающегося огнезащитного покрытия «Феникс СТВ» по данным испытаний на огнестойкость монолитного перекрытия. *Пожарная безопасность: теория и практика*, (11), 43–51.

218. Ковалев, А. И. (2012). Оценка огнестойкости многопустотных железобетонных перекрытий с огнезащитными покрытиями расчетно-экспериментальным методом. *Научный вестник УкрНДППБ*, (2), 28–34.

219. Ковальов, А. І., Отрош, Ю. А., & Данілін, О. М. (2019). Експериментальні дослідження вогнестійкості залізобетонних перекриттів з системою вогнезахисту. *Проблемы пожарной безопасности*, (45), 73–78.

220. Otrosh, Y., Surianinov, M., Holodnov, O., & Starova, O. (2019). Experimental and computer researches of ferroconcrete beams at high-temperature influences. In *Materials Science Forum* (Vol. 968, pp. 355–360). Trans Tech Publications Ltd.

221. ДСТУ, Б. (2007). 1.1-14: 2007 (EN 1365-4: 1999, NEQ). Колони. Метод випробування на вогнестійкість. – Введено вперше. Прийнято та надано чинності: наказ Міністерства регіонального розвитку та будівництва України від 22 червня 2007 р. № 63. К.: Мінрегіонбуд України.

222. ДСТУ Б В.1.1–4–98*. Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. [Чинний від 1998-10-28]. Вид. Держбуд України, 2005. 18 с.

223. Ковальов, А. І., Отрош, Ю. А., Коссе, А. Г., & Черненко, О. М. (2020). Залежність точності визначення теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів від параметрів моделі. *Проблемы пожарной безопасности*, (48), 63–70.

224. Круковский, П. Г. (2003). Расчетно-экспериментальный подход к анализу процессов теплообмена (методология и примеры

применения). *Промышленная теплотехника (приложение к журналу)*, 25(4), 396–398.

225. Ковалев, А.И. (2012). Влияние погрешностей в измерении температур на точность определения теплофизических характеристик покрытий монолитных железобетонных перекрытий. *Пожарна безпека: теорія і практика*, (12), 41–45.

226. Kovalov, A. I., Otrosh, Y. A., Kovalevska, T. M., & Safronov, S. O. (2019, December). Methodology for assessment of the fire-resistant quality of reinforced-concrete floors protected by fire-retardant coatings. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 708, No. 1, p. 012058). IOP Publishing.

227. Ковальов, А. І. (2017). Вплив випадкових помилок у вимірюванні температур на похибку визначення теплофізичних характеристик покриттів залізобетонних перекрыттів. *Проблемы пожарной безопасности*, (41), 87–91.

228. Ковалев, А.И., Круковский, П.Г., & Абрамов А.А. (2012). Анализ влияния ошибок измерения температур на погрешность определения теплофизических и огнезащитных характеристик покрытий железобетонных перекрытий. *Пожарна безпека: теорія і практика*, (10), 66–72.

229. Ковалев, А. И. (2013). Влияние параметров модели на точность определения теплофизических характеристик огнезащитного покрытия. *Пожарна безпека: теорія і практика*, (14), 64–68.

230. Ковальов, А. І., Отрош, Ю. А., Коссе, А. Г., & Черненко, О. М. (2020). Залежність точності визначення теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів від параметрів моделі. *Проблемы пожарной безопасности*, (48), 63–70.

231. Ковалев, А.И. (2012). Влияние погрешностей в измерении температур на точность определения теплофизических характеристик покрытий монолитных железобетонных перекрытий. *Пожарна безпека: теорія і практика*, (12), 41–45.

232.Ковальов, А. І. (2017). Вплив випадкових помилок у вимірюванні температур на похибку визначення теплофізичних характеристик покриттів залізобетонних перекриттів. *Проблеми пожежної безпеки*, (41), 87–91.

233.Ковалев, А.И., Круковский, П.Г., & Абрамов, А.А. (2012). Анализ влияния ошибок измерения температур на погрешность определения теплофизических и огнезащитных характеристик покрытий железобетонных перекрытий. *Пожезна безпека: теорія і практика*, (10), 66–72.

234.European Committee for Standardization. (2004). Eurocode 2: Design of concrete structures–Part 1-2: General rules–Structural fire design.

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

236.Ковальов, А. І. (2017). Дослідження точності визначення параметрів покриттів для вогнезахисту сталевих конструкцій. *Промислове будівництво та інженерні споруди*, (4), 11-15.

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

238.Ковальов, А. І., Зобенко, Н. В., Отрош, Ю. А., Хмиров, І. М., & Данілін, О. М. (2018). Точність визначення параметрів покриттів сталевих конструкцій при вуглеводневому режимі пожежі. *Проблеми пожежної безпеки*, (43), 73–79.

239.Ковалев, А. И., & Зобенко, Н. В. (2016). Исследование точности определения параметров огнезащитных покрытий металлических конструкций. *Safety & Fire Technology*, (43), 45–50.

240.Ковальов, А.І., Отрош, Ю.А., & Томенко, В.І. (2020). Моделювання теплового стану сталевих конструкцій за температурного режиму вуглеводневої пожежі. *Проблеми надзвичайних ситуацій*, (31), 187–197.

241.Ковальов, А. І., Отрош, Ю. А., Томенко, В. І., Данілін, О. М., Безугла, Ю. С., & Карпець, К. М. (2020). Оцінювання вогнезахисної здатності реактивних покриттів сталевих конструкцій. *Проблеми надзвичайних ситуацій*, 2(32), 44–55.

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

243.Code, P. (2007). Eurocode 3: Design of Steel Structures-Part 1-2: General Rules-Structural Fire Design. *London: European Committee for Standardisation*.

244.Ковалев, А. И. К проблеме оценки адгезии огнезащитных покрытий (2007). *Научный вестник строительства*, (41), 273–275.

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

246.Ковальов, А.І., Отрош, Ю.А., Томенко, В.І., Васильєв, О.Б. (2021). Оцінювання вогнезахисної здатності новостворених вогнезахисних покриттів сталевих конструкцій. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*, (85), 79–88.

247.Отрош, Ю.А., Ковальов, А.І., Пурденко, Р.Р., Рашкевич, Н.В., Майборода, Р.І. (2022). Дослідження вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій для підвищення рівня пожежної безпеки об'єктів. *Проблеми надзвичайних ситуацій*, 2 (36), 102–122.

248.Ковальов, А.І., Поклонський, В.Г., Отрош, Ю.А., Томенко, В.І., Юрченко, С.П. (2022). Calculation of fire resistance of fire protected reinforced

concrete structures (Розрахунок вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій), *Проблеми надзвичайних ситуацій*, 1 (35), 17–35.

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

250. Kovalov, A., Otrosh, Y., Poklonskyi, V., Semkiv, O. & Tomenko, M. (2022). Research of Fire Resistance of Fire Protected Reinforced Concrete Structures. *In Materials Science Forum* (Vol. 1066 MSF, pp. 224–232). Trans Tech Publications Ltd. <https://doi:10.4028/p-5nb606>.

251. Kovalov, A., Purdenko, R., Otrosh, Y., Tomenko, V., Rashkevich, N., Shcholokov, E., Pidhornyy, M., Zolotova, N., Suprun, O. (2022). Assessment of fire resistance of fireproof reinforced concrete structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (119)), 53–61. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266219>.

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

253. Ковальов А.І., Отрош Ю.А., Пурденко Р.Р. Забезпечення вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних колон // *Проблеми пожежної безпеки 2022 («Fire Safety Issues 2022»): матеріали Міжнародної науково-методичної конференції*. – Харків: НУЦЗ України, 12 жовтня 2022 року. – С. 234–237.

254. Спосіб визначення фактичної межі вогнестійкості будівельних конструкцій експлуатованих будівель та споруд / Отрош Ю.А., Рибка Є.О., Ковальов А.І., Васильченко О.В., Рубан А.В., Петухова О.А., Томенко В.І., Словінський В.К., Пат. 146414 України, МПК G01N 3/24 (2006.01), заявник та

патентовласник Національний університет цивільного захисту України. № u 2020 06685, заявка 16.10.2020, опуб. 17.02.2021, Бюл. № 7.

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

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

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

258.Ковальов, А.І., Пурденко, Р.Р., Отрош, Ю.А., Томенко, В.І., Рашкевич, Н.В., Юрченко, С.П. (2022). Моделювання нестационарного прогріву вогнезахисних залізобетонних колон. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 2(14), 87–98.

259.Нуянзін В.М., Ковальов А.І. Обґрунтування методики дослідження впливу кліматичних чинників на вогнестійкість залізобетонної колони. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КрНУ. 2014. Випуск 6(89). частина 1. С.153–157.

260.Спосіб визначення межі вогнестійкості будівельної конструкції / Отрош Ю.А., Ковальов А.І., Данілін О.М., Рудешко І.В., Гаркавий С.Ф., Рибка Є.О. Пат. 138535 України, МПК G01N 3/24 (2006.01), заявник та

патентовласник Національний університет цивільного захисту України. № u 2019 06467, заявка 10.06.2019, опуб. 25.11.2019, Бюл. № 22.

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

262.Ковальов, А.І., Отрош, Ю.А., Пурденко, Р.Р., Томенко, В.І. (2022). Дослідження вогнестійкості вогнезахисених сталевих будівельних конструкцій. *Пожежна безпека*, (41), 57–66.

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

264.Ковальов, А.І., Отрош, Ю.А., Рашкевич Н.В., Рудаков С.В., Томенко В.І., Юрченко С.П. (2023). Оцінка вогнестійкості вогнезахисених сталевих конструкцій для забезпечення пожежної безпеки об'єктів. *Проблеми надзвичайних ситуацій*, (37), 282–292.

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

ДОДАТОК А.

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію
результатів дисертації

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Монографії:

1. Sadkovyi, V., Andronov, V., Semkiv, O., **Kovalov, A.**, Rybka, E., Otrosh, Yu. et. al. Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER. 2021. 180 p. <http://doi.org/10.15587/978-617-7319-43-5>. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Статті у періодичних виданнях України, включених до категорії «А»

Переліку наукових фахових видань України:

2. **Kovalov, A.**, Purdenko, R., Otrosh, Y., Tomenko, V., Rashkevich, N., Shcholokov, E., Pidhornyy, M., Zolotova, N., Suprun, O. (2022). Assessment of fire resistance of fireproof reinforced concrete structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (119)), 53–61. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266219> (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).

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

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

4. Нуянзін В.М., **Ковальов А.І.** Обґрунтування методики дослідження

впливу кліматичних чинників на вогнестійкість залізобетонної колони. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КрНУ. 2014. Випуск 6(89). частина 1. С.153–157. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

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

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

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

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

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

Periodicals Directory, Academic Research Index – ResearchBib, Google Scholar).

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

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

12. **Ковальов А.І.**, Отрош Ю.А., Коссе А.Г., Черненко О.М. Залежність точності визначення теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів від параметрів моделі. *Проблеми пожежної безпеки*. Х.: НУЦЗУ. 2020. № 48. С.63–70. (Видання включено до міжнародних наукометричних баз Ulrich's Periodicals Directory, Academic Research Index – ResearchBib, Google Scholar).

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

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

15. **Ковальов А.І.**, Отрош Ю.А., Томенко В.І., Кондратьєв А.В. Оцінювання вогнестійкості вогнезахисених сталевих конструкцій. *Вісник*

Донецького гірничого інституту. Донецьк: ДВНЗ «ДНТУ». 2021. № 2. С. 149–158. (Видання включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Research Bib, [Citefactor](#), [International Society for Research Activity \(ISRA\) Journal Impact Factor \(JIF\)](#), International Accreditation and Research Council (IARC), [Root Society for Indexing and Impact Factor Service \(Rootindexing\)](#), General Impact Factor (GIF)).

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

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

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

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

[\(Rootindexing\)](#), General Impact Factor (GIF)).

20. **Ковальов А.І.**, Пурденко Р.Р., Отрош Ю.А., Томенко В.І., Рашкевич Н.В., Юрченко С.П. Моделювання нестационарного прогріву вогнезахищених залізобетонних колон. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. Київ: ІДУтаНДЦЗ. 2022. № 2(14). С.89-100. (Видання включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Google Scholar).

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

22. Отрош Ю.А., **Ковальов А.І.**, Рашкевич Н.В., Тараненко І.С. Оцінювання вогнестійкості будівлі із вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій. *Комунальне господарство міст, серія: технічні науки та архітектура*. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. 2023. № 3(177). С.134-141. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus).

Статті у наукових фахових виданнях України:

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

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

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

26. **Ковалев А.И.**, Круковский П.Г., Черненко К.А., Метель М.А.,

Абрамов А.А. Моделирование теплового состояния и огнестойкости многопустотного железобетонного перекрытия. *Пожезна безпека: збірник наукових праць*. 2012. № 21. С. 85–94.

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

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

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

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

31. **Ковальов А.І., Зобенко Н.В.** Методика попередньої оцінки вогнезахисної здатності покриттів для сталевих конструкцій в умовах температурного режиму вуглеводневої пожежі. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2016. № 1. С. 59–65.

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

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

34. **Ковальов А.І., Ведула С.А., Грушовінчук О.В.** Особливості та проблеми визначення прогнозованого строку придатності вогнезахисних

покриттів сталевих конструкцій. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2017. Вип. 34. С. 232–238.

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

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

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

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

37. **Kovalov A.**, Otrosh Y., Ostroverkh O., Hrushovinchuk O., Savchenko O. Fire resistance evaluation of reinforced concrete floors with fire-retardant coating by calculation and experimental method. *E3S Web of Conferences*. 2018. 60. 00003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000003>. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).

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

міжнародної наукометричної бази Scopus).

39. **Kovalov A.**, Konoval V., Khmyrova A., Dudko K. Parameters for simulation of the thermal state and fire-resistant quality of hollow-core floors used in the mining industry. *E3S Web of Conferences*. 2019. 123. 01022. https://doi.org/10.1051/e3sconf/2019123010_22. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Scopus).

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

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

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

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

Відомості про апробацію результатів дисертації:

44. **Ковальов А.І.**, Качкар Є.В., Зобенко Н.В., Парахоненко С.Г. Особливості та проблеми визначення вогнезахисної здатності покриттів металевих конструкцій при температурному режимі вуглеводневої пожежі // Надзвичайні ситуації: безпека та захист: матеріали IV Міжнародної науково-

практичної конференції, 9-10 жовтня 2014 року, Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2014. С. 127–129. (Форма участі – очна).

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

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

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

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

49. **Ковальов А.І.**, Зобенко Н.В., Ведула С.А. Визначення характеристики вогнезахисної здатності покриттів металевих конструкцій при їх випробуванні в умовах температурного режиму вуглеводневої пожежі // Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції, 20–21 жовтня 2016 року, Львів: ЛДУБЖД, 2016. С. 174. (Форма участі – заочна).

50. Нуянзін В.М., **Ковальов А.І.**, Ведула С.А., Нестеренко А.А., Жаврук

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

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

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

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

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

55. **Ковальов А.І.**, Гаркавий С.Ф., Морозова Д.М., Оллапалло Томас. Дослідження вогнезахисної здатності покриттів сталевих конструкцій //

Проблеми надзвичайних ситуацій: матеріали міжнародної науково-практичної конференції, 20 травня 2020 року, Харків: НУЦЗУ, 2020. С. 71–72. (Форма участі – заочна).

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

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

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

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

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

Патенти

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

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

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

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

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

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

66. Методика визначення характеристики вогнезахисної здатності

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

ДОДАТОК Б.

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи в освітній процес
Національного університету цивільного захисту України

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Проректор Національного університету
 цивільного захисту України
 з навчальної та методичної роботи



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня
 доктора технічних наук кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника
 Ковальова Андрія Івановича у освітній процес

Комісія у складі:

Голови: начальника факультету пожежної безпеки, доктора наук з державного управління, професора Роміна А.В.

та членів: доцента кафедри пожежної профілактики в населених пунктах факультету пожежної безпеки, кандидата технічних наук, доцента Миргород О.В.;

викладача кафедри пожежної профілактики в населених пунктах факультету пожежної безпеки, PhD Рашкевич Н.В.

підтверджує, що результати дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Ковальова Андрія Івановича передані у вигляді теоретичних та методологічних положень для використання в освітньому процесі кафедри пожежної профілактики в населених пунктах Національного університету цивільного захисту України при підготовці здобувачів вищої освіти за першим (бакалаврським) та другим (магістерським) рівнями вищої освіти в галузі знань 26 «Цивільна безпека» зі спеціальностей 261 «Пожежна безпека» та 263 «Цивільна безпека» під час викладання навчальних дисциплін «Стійкість будівель та споруд при пожежі» (модуль 4, тема «Розрахунок межі вогнестійкості збірної багатопустотної плити за ознакою втрати несучої спроможності»), «Будівлі і споруди та їх поведінка в умовах пожежі» (модуль 1, тема «Визначення межі вогнестійкості металевих конструктивних елементів»), «Інноваційні інженерно-технічні заходи пожежної безпеки» (модуль 1, тема «Система забезпечення пожежної безпеки об'єктів»).

Голова комісії:
 начальник факультету пожежної безпеки,
 доктор наук з державного управління, професор

Андрій РОМІН

Члени комісії:
 доцент кафедри пожежної профілактики
 в населених пунктах факультету пожежної безпеки,
 кандидат технічних наук, доцент

Оксана МИРГОРОД

викладач кафедри пожежної профілактики
 в населених пунктах
 факультету пожежної безпеки, PhD

Ніна РАШКЕВИЧ

ДОДАТОК В.

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи в державні стандарти
України



МІНІСТЕРСТВО РЕГІОНАЛЬНОГО РОЗВИТКУ, БУДІВНИЦТВА ТА ЖИТЛОВО-КОМУНАЛЬНОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ

**ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
„ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ”
(ДП НДІБК)**



юридична адреса: вул. І.Клименка, 5/2, м. Київ-37, 03680, поштова адреса: вул. Преображенська, 5/2, м. Київ-37, 03037; тел. (044) 249-72-34, факс (044) 248-89-09
www.niisk.com; e-mail: niisk@ndibk.gov.ua; ndibk-office@ndibk.gov.ua; код ЄДРПОУ 02495431

08.04.2019 № 100-582 На № _____ від _____

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук Ковальова Андрія Івановича

Результати дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук Ковальова Андрія Івановича було використано при розробленні відповідних розділів нормативних документів:

- ДСТУ-Н Б В.1.2-17:2016 «Настанова щодо науково-технічного моніторингу будівель і споруд»;
- ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 «Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість».

Заступник директора Інституту
з наукової роботи
к.т.н., с.н.с.



Ю. С. Слюсаренко
Ю. С. Слюсаренко

ДОДАТОК Г.

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи в роботу ТОВ «ІПК
«Спецзахист»



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ТОВ «ІПВК «Спецзахист»

Денис ЛЮБЧЕНКО

10 01 2023 року

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Ковальова Андрія Івановича

Комісія в складі:

голови – заступника директора ТОВ «ІПВК «Спецзахист» Романа СОВГИРИ

та членів – технічного директора ТОВ «ІПВК «Спецзахист» Володимира ТРУБНІКОВА, провідного інженера ТОВ «ІПВК «Спецзахист» Сергія САРАПАНЮКА склала даний акт про те, що результати дисертаційної роботи кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Ковальова Андрія Івановича впроваджені в діяльність ТОВ «ІПВК «Спецзахист».

Це дозволило підвищити ефективність послуг у сфері будівництва, архітектури та інжинірингу, що надає приватне підприємство ТОВ «ІПВК «Спецзахист», а саме:

- проектування будівель та споруд з використанням залізобетонних та сталевих будівельних конструкцій з урахуванням вимог вогнестійкості (ВП «ЗАЕС» 2012-2022 рр м. Энергодар, ВП «РАЕС» 2017-2020 рр. м. Вараш);
- розрахунок меж вогнестійкості залізобетонних та сталевих будівельних конструкцій, в тому числі і вогнезахисних (ВП «ЗАЕС» 2012-2022 рр м. Энергодар, ВП «РАЕС» 2017-2020 рр. м. Вараш, ВП «ХАЕС» 2017-2021 рр, м. Нетішин, ВП «ПАЕС» 2017-2023 м. Південноукраїнськ).

Результати дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Ковальова Андрія Івановича використані при оцінюванні вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних та сталевих будівельних конструкцій при проектуванні вогнезахисту на об'єктах промислового та цивільного будівництва. Використання розроблених методів оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних та сталевих будівельних конструкцій дозволило прийняти ефективні рішення по експертизі протипожежного стану об'єктів, а також при розрахунку вогнестійкості будівельних конструкцій, розташованих на території Запорізької, Рівненської, Миколаївської та Хмельницької областей.

Завдяки впровадженню результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Ковальова Андрія Івановича вдалося підвищити ефективність виконання процедур при проектуванні вогнезахисних будівельних конструкцій приблизно на 15%.

Голова комісії:

Заступник директора
ТОВ «ІПК «Спецзахист»



Роман СОВГИРЯ

Члени комісії:

Технічний директор
ТОВ «ІПК «Спецзахист»



Володимир ТРУБНІКОВ

Провідний інженер
ТОВ «ІПК «Спецзахист»



Сергій САРАПАНЮК

Докторант
Національного університету
цивільного захисту України
к.т.н., с.н.с.



Андрій КОВАЛЬОВ

ДОДАТОК Г.

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи в роботу Головного управління ДСНС України в Одеській області

ЗАТВЕРДЖУЮ

Т.в.о. начальника Головного
управління ДСНС України
в Одеській області
полковник служби цивільного
захисту

Ігор БУДАЛЕНКО

2023 року

**АКТ**

впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Ковальова Андрія Івановича

Комісія у складі:

голови – заступника начальника Головного управління із запобігання надзвичайним ситуаціям полковника служби цивільного захисту Платонова Д.В. та членів – начальника управління запобігання надзвичайним ситуаціям полковника служби цивільного захисту Пашевича В.І., заступника начальника управління запобігання надзвичайним ситуаціям - начальника відділу нормативної та ліцензійної роботи майора служби цивільного захисту Невмиваного Я.В. склала даний акт про те, що результати дисертаційної роботи кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Ковальова Андрія Івановича, впроваджені в діяльність Головного управління.

Це дозволило підвищити ефективність заходів щодо здійснення державного нагляду (контролю) за додержанням і виконанням вимог законодавства у сфері пожежної безпеки.

Результати дисертаційної роботи використовувались при розгляді проектної документації на будівництво та реконструкцію будівель та споруд в частині оцінювання меж вогнестійкості сталевих конструкцій, оброблених вогнезахисними речовинами, за допомогою розробленого методу оцінювання вогнестійкості вогнезахиснених сталевих конструкцій на таких об'єктах:

- склад продукції ТОВ «Дельта - Вільмар Україна» Одеська область, Одеський р-н, м. Южне, вул. Індустріальна, 6;
- зливо-наливна естакада ПАТ «Одеснафтопродукт» м. Одеса, вул. Вапняна, 54.

Використання розробленого методу оцінювання вогнестійкості вогнезахиснених сталевих будівельних конструкцій дозволило прийняти ефективні рішення по експертизі протипожежного стану об'єктів, а також

при розрахунку вогнестійкості будівельних конструкцій, розташованих на території міста Одеси та Одеської області.

Завдяки впровадженню результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Ковальова Андрія Івановича вдалося підвищити ефективність заходів щодо здійснення державного нагляду (контролю) за додержанням і виконанням вимог законодавства у сфері пожежної безпеки, а саме при проектуванні вогнезахисту сталевих будівельних конструкцій об'єктів промислового та цивільного будівництва приблизно на 15%.

Голова комісії:
заступник начальника
Головного управління
із запобігання надзвичайним ситуаціям



Д.В. Платонов

Члени комісії:
начальник управління
запобігання надзвичайним ситуаціям



В.І. Пашевич

начальник відділу
нормативної та ліцензійної роботи
господарювання та ліцензування

Я.В. Невмиваний

ДОДАТОК Д.

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи в роботу приватного підприємства «ПроектБудСтар»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

приватного підприємства

«ПроектБудСтар»



Наталія КОНОГРАЙ

25.11 2022 року

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук кандидата технічних наук, старшого наукового
співробітника Ковальова Андрія Івановича

Комісія в складі:

голови – головного інженера проекту приватного підприємства
«ПроектБудСтар» Романа ПУРДЕНКА

та членів – інженера приватного підприємства «ПроектБудСтар»
Владислава КОВАЛЯ, інженера приватного підприємства «ПроектБудСтар»
Катерини СЕКРЕТ склала даний акт про те, що результати дисертаційної
роботи кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Ковальова
Андрія Івановича впроваджені в діяльність приватного підприємства
«ПроектБудСтар».

Це дозволило підвищити ефективність послуг у сфері будівництва,
архітектури та інжинірингу, що надає приватне підприємство «ПроектБудСтар»
під час проектування будівель та споруд з використанням залізобетонних та
сталевих будівельних конструкцій з урахуванням вимог вогнестійкості, в тому
числі і вогнезахищених, а саме:

- реконструкція ковбасного цеху під виробництво білково-вітамінного корму та біопалива по вул. Промисловій, 8 в місті Корсунь-Шевченківський Черкаської області (рік будівництва 2017-2018);
- будівництво багатоквартирного житлового будинку з вбудованими нежитловими приміщеннями по вул. Сумгайтській, 15 в місті Черкаси.

Голова комісії:

Головний інженер проекту

приватного підприємства «ПроектБудСтар»

Роман ПУРДЕНКО

Члени комісії:

Інженер

приватного підприємства «ПроектБудСтар»

Владислав КОВАЛЬ

Інженер

приватного підприємства «ПроектБудСтар»

Катерина СЕКРЕТ

ДОДАТОК Е.

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес
Черкаського державного технологічного університету

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Ректор Черкаського державного
технологічного університету,
д-р політ. наук, професор



Олег ГРИГОР

« 09 » 12 2023 р.

АКТ

впровадження в навчальний процес

Черкаського державного технологічного університету
результатів дисертаційної роботи **Ковальова Андрія Івановича**
на тему: "Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості
вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій"

Комісія у складі: голови – першого проректора, канд. техн. наук, професора Гончарова А.В. і членів комісії: декана факультету технологій, будівництва та раціонального природокористування, канд. техн. наук, доцента Грецького Д.В., завідувача кафедри промислового та цивільного будівництва, канд. техн. наук, доцента Пряника С.П., завідувача кафедри геодезії, землеустрою, будівельних конструкцій та безпеки життєдіяльності, канд. техн. наук, доцента Ротте С.В. склала даний акт про те, що наступні результати дисертаційних досліджень Ковальова А.І. впроваджені в навчальний процес факультету технологій, будівництва та раціонального природокористування Черкаського державного технологічного університету при виконанні курсових і дипломних проектів, при викладанні лекцій, проведенні лабораторних та практичних занять з навчальних дисциплін ("Металеві конструкції", "Будівельні конструкції (залізобетонні)", "Залізобетонні та армокам'яні конструкції", "Модернізація, реконструкція та ремонтно-відновлювальні роботи в будівництві", "Випробування та обстеження споруд"):


- розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій;
- розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій;

- структурно-логічні схеми застосування розрахунково-експериментальних методів оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних та сталевих конструкцій;
 - методологічну базу для розрахункового оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних та сталевих будівельних конструкцій шляхом створення скінченно-елементних моделей вогнезахисних конструкцій за допомогою сучасних програмних комплексів (ЛІРА-САПР, ANSYS), що дозволяють моделювати вогневий та механічний вплив на вогнезахиснену конструкцію з достатньою для інженерних розрахунків точністю і є теоретичною основою для створення відповідної нормативної бази;
 - установку для визначення адгезійної міцності вогнезахисних покриттів для захисту сталевих конструкцій, що засновано на методі здуття плівки.
- Крім цього в навчальному процесі використовується монографія:
- Sadkovyi, V., Andronov, V., Semkiv, O., Kovalov, A., Rybka, E., Otrosh, Yu. et. al. Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER. 2021. 180 p. <http://doi.org/10.15587/978-617-7319-43-5>.

Використання студентами і аспірантами результатів дисертаційної роботи Ковальова А.І. дозволяє їм на більш високому науково-технічному рівні виконувати дипломні проекти, магістерські роботи та кандидатські дисертації.


Голова комісії:

Перший проректор,
канд. техн. наук, доцент

 Артем ГОНЧАРОВ

Члени комісії:


Декан факультету технологій, будівництва
та раціонального природокористування,
канд. техн. наук, доцент

 Денис ГРЕЦЬКИЙ

Завідувач кафедри промислового та цивільного
будівництва, канд. техн. наук, доцент

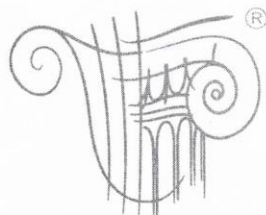
 Сергій ПРЯНИК

Завідувач кафедри геодезії, землеустрою,
будівельних конструкцій та безпеки
життєдіяльності, канд. техн. наук, доцент

 Сергій ПОТТЕ

ДОДАТОК Є.

Довіка про впровадження результатів дисертаційної роботи в діяльність
ТОВ «ЛІРА САПР»



ЛІРА САІПР

Товариство з обмеженою
відповідальністю «ЛІРА САІПР»
Україна, 04053, м. Київ, Киянівський
провулок, 7-а
Т./ф.+38(044) 590-58-86,
e-mail: info@liraland.com.ua
<http://www.liraland.ua>

Дата 22.12.23 № 200
На № _____ від _____

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за темою «Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій» за спеціальністю 21.06.02 – пожежна безпека кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Ковальова Андрія Івановича

Результати дисертаційного дослідження Ковальова Андрія Івановича було використано при розробці та реалізації моделей вогнезахищених будівельних конструкцій (вогнезахищеного залізобетонного перекриття, залізобетонної колони, сталеві колони, сталевих навантажених і ненавантажених балок).

Назва впроваджених результатів:

1. Розроблена методика для розрахункового оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних та сталевих будівельних конструкцій дозволяє моделювати вогневий та механічний вплив на вогнезахищену конструкцію з достатньою для інженерних розрахунків точністю.
2. Розроблені комп'ютерні моделі теплового та напружено-деформованого стану вогнезахищених конструкцій дозволяють враховувати теплофізичні та механічні властивості матеріалів, з яких складається конструкція, нелінійні закони деформування матеріалів моделі, міцнісні та деформаційні властивості матеріалів при впливі пожежі.
3. Проведено верифікацію точності розроблених скінчено-елементних моделей вогнезахищеного багатопустотного залізобетонного перекриття з натурними експериментальними дослідженнями.

Завдяки впровадженню результатів дисертаційної роботи Ковальова Андрія Івановича вдалося підвищити ефективність надання послуг у сфері розрахунку і проектування будівельних конструкцій, в тому числі і вогнезахищених, що надає ТОВ «ЛІРА САІПР», на 15%.

Директор
ТОВ «ЛІРА-САІПР»



М.С. Барабаш

ДОДАТОК Ж.

Листи підтримки результатів дисертаційної роботи

Голові Спеціалізованої вченої ради
Д 64.707.04
доктору технічних наук, професору
Андронову Володимирі Анатолійовичу

Лист-підтримка

результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора
технічних наук кандидата технічних наук, старшого наукового
співробітника Ковальова Андрія Івановича

Приватне науково-виробниче підприємство «Прометей-Сервіс» просить підтримати дисертаційну роботу на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Ковальова Андрія Івановича, результати якої були використані в роботі підприємства.

Результати роботи знайшли застосування при розробці проекту №02/01/20-ВЗ проведення робіт з вогнезахисту металевих конструкцій на об'єкті: «Будівництво будівлі громадського призначення та благоустрій прилеглої території по бульвару Шевченка, 207 в м. Черкаси». В ході виконання робіт Ковальов А.І. взяв участь у обґрунтуванні товщин реактивного та пасивного вогнезахисного покриття для забезпечення нормованих значень межі вогнестійкості сталевих колон та балок об'єкту.

Завдяки впровадженню результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук Ковальова Андрія Івановича у вигляді розробленого методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих будівельних конструкцій вдалося скоротити час розрахунку товщини вогнезахисного покриття, теплофізичні характеристики якого визначено уточненим методом розв'язання оберненої задачі теплопровідності. Застосування запропонованого методу дозволило зменшити витрати матеріалу на вогнезахисне оброблення сталевих конструкцій об'єкту в середньому на 20% та більш точно визначити мінімально необхідні значення товщин вогнезахисних покриттів для забезпечення вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій.

Головний інженер проекту
приватного науково-виробничого
підприємства «Прометей-Сервіс»



Кирило БАДЬОР

Директор приватного
науково-виробничого підприємства
«Прометей-Сервіс»



Олексій КИРИЛОВ



Голові Спеціалізованої вченої ради
Д 64.707.04
доктору технічних наук, професору
Андронову Володимирі Анатолійовичу

Лист-підтримка

результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора
технічних наук кандидата технічних наук, старшого наукового
співробітника Ковальова Андрія Івановича

Напрямок технічної експертизи страхова компанія «Уніка» просить підтримати дисертаційну роботу на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Ковальова Андрія Івановича, результати якої були використані в роботі напрямку.

Так, результати роботи знайшли застосування при проведенні технічних експертиз та оцінки прийнятного ризику збудованих об'єктів, що мають каркасну схему будови з застосуванням несучих металевих конструктивних елементів з наявним вогнезахисним обробленням.

Використання розробленого методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисених сталевих будівельних конструкцій дозволило прийняти ефективні рішення по експертизі протипожежного стану об'єктів, а також при розрахунку вогнестійкості вогнезахисених будівельних конструкцій, що безпосередньо та позитивно вплинуло на оцінку ризику.

Завдяки впровадженню результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Ковальова Андрія Івановича вдалося відобразити нові підходи при оцінці ризиків, впровадити дану методику під час проведення технічних експертиз.

Керівник напрямку з технічної експертизи



Дмитро Демидов

У К Р А Ї Н А**Приватне підприємство "ПОЖЗАХИСТ-2020"**

29027, Хмельницька область, м. Хмельницький, вул. Лісогринівецька, 24/2, кв. 55
тел. +380-98-78-20-600, e-mail: 43846430w@gmail.com
р/р UA233510050000026002879029792 в АТ «УКРСИББАНК
Код ЄДРПОУ 43846430

Від « 03 » лютого 2023 р.
Вих. № 1

Голові Спеціалізованої вченої ради
Д 64.707.04
доктору технічних наук, професору
Андронову Володимиру Анатолійовичу

Лист-підтримка

результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора
технічних наук кандидата технічних наук, старшого наукового
співробітника Ковальова Андрія Івановича

Приватне підприємство "ПОЖЗАХИСТ-2020" в особі директора Гонтара Олександра Олександровича просить підтримати дисертаційну роботу на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Ковальова Андрія Івановича, результати якої були використані в роботі Приватного підприємства "ПОЖЗАХИСТ-2020".

Результати роботи знайшли застосування при виконанні робіт з питань будівництва, експертизи, поведінки будівельних конструкцій в умовах високотемпературних впливів. Результати роботи використані при:

- розробці проекту № ПМВ-01/2021 проведення робіт з вогнезахисту металевих конструкцій на об'єкті: Виставкового залу Хмельницької торгово-промислової палати, що знаходиться за адресою: Україна, Хмельницька область, місто Хмельницький, вул. Подільська, 109/1.

- при оцінюванні меж вогнестійкості металевих конструкцій колон REI-60, оброблених вогнезахисними речовинами, за допомогою розробленого методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних металевих конструкцій колон REI-60 виставкового залу Хмельницької торгово-промислової палати, що знаходиться за адресою: Україна, Хмельницька область, місто Хмельницький, вул. Подільська, 109/1.

В ході виконання робіт Ковальов А.І. взяв участь у розрахунках товщин вогнезахисних покриттів, що використовувалися для підвищення меж вогнестійкості будівельних конструкцій об'єктів.

Завдяки впровадженню результатів дисертаційної роботи Ковальова Андрія Івановича вдалося підвищити ефективність надання послуг у сфері оцінювання меж вогнестійкості будівельних конструкцій і проектування систем вогнезахисту на об'єктах цивільного та промислового будівництва на 18%.

Директор ПП «Пожзахист-2020»

М.П.



Гонтар О.О.

ДОДАТОК 3.
Ліцензія ЛІРА-САІР

Ліцензія №1/8583

*На використання в учбовому процесі комплекту для
розрахунку і проектування будівельних конструкцій*

**ACADEMIC set
(ПК ЛІРА-САПР 2021)**

Ліцензіар:

ТОВ «ЛІРА САПР»

м.Київ, Киянівський провулок, 7-а



ЛІРА САПР

Ліцензіат:

Ковальов Андрій Іванович

Національний університет цивільного захисту України, м. Харків

Кількість робочих місць:

Одне

ID ключів:

993425467

Підстава:

Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір
комп'ютерна програма ПК «ЛІРА-САПР» №80038 від 06.07.2018р.

Директор

ТОВ «ЛІРА САПР»

Барабаш М.С.

16.02.2022



LIRALAND
GROUP

ДОДАТОК И.

Локальний кошторис, розроблений в комплексі АВК - 5 на будівельні роботи
щодо підвищення вогнестійкості залізобетонних колон за допомогою
додаткового армування

Розрахунок витрат із застосуванням додаткового армування

Економічне обґрунтування застосування додаткового армування
01

Локальний кошторис на будівельні роботи №02-01-02 Колони залізобетонні без вогнезахисту

Основа:
креслення (специфікації) №

Кошторисна вартість 1640,336 тис. грн.
Кошторисна трудомісткість 2,7605 тис.люд.год.
Кошторисна заробітна плата 326,763 тис. грн.
Середній розряд робіт 3,7 розряд

Складений за поточними цінами станом на "18 березня" 2023 р.

№ Ч.ч.	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.год.	
					Всього	експлуатації машин	Всього	заробітної плати	експлуатації машин	не зайнятих обслуговуванням машин	
										заробітної плати	в тому числі заробітної плати
									на одиницю	всього	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	КБ6-15-1	Улаштування колон цивільних будівель у металевій опалубці	100м ³	1,245	590943,41	135570,64	735725	191179	168785	1432,4400	1783,39
					153557,57	68032,01			84700	547,2600	681,34
2	С147-4-20	Стрижнева арматура А-III, діаметр 20 мм	100кг	229,8	3303,18	-	759071	-	-	-	-
					-	-			-	-	-
Разом прямі витрати по кошторису							1494796	191179	168785		1783,39
Разом будівельні роботи, грн.							1494796		84700		681,34
в тому числі:											
вартість матеріалів, виробів та комплектів, грн.							1134832				
всього заробітна плата, грн.							275879				
Загальновиробничі витрати, грн.							145540				
трудомісткість в загальновиробничих витратах, люд.год.							295,77				
заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн.							50884				
Всього будівельні роботи, грн.							1640336				

ДОДАТОК І.

Локальний кошторис, розроблений в комплексі АВК - 5 на будівельні роботи щодо підвищення вогнестійкості залізобетонних колон допомогою використанням вогнезахисних покриттів

Розрахунок витрат із застосуванням вогнезахисного покриття

Економічне обґрунтування застосування вогнезахисного покриття

Локальний кошторис на будівельні роботи №02-01-01 Із застосуванням вогнезахисних покриттів Колони залізобетонні

Основа:
креслення (специфікації) №

Кошторисна вартість	1297,802 тис. грн.
Кошторисна трудомісткість	4,10544 тис.люд.год.
Кошторисна заробітна плата	488,937 тис. грн.
Середній розряд робіт	4,0 розряд

Складений за поточними цінами станом на "18 березня" 2023 р.

№ Ч.ч.	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.год.		
					Всього	експлуатації машин	Всього	заробітної плати	експлуатації машин	не зайнятих обслуговуванням машин		
										тих, що обслуговують машини		
					заробітної плати	в тому числі за- робітної плати			в тому числі за- робітної плати	на одини- цю	всього	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	КБ6-15-1	Улаштування колон цивільних будівель у металевій опалубці	100м ³	1,245	<u>590943,41</u> 153557,57	<u>135570,64</u> 68032,01	735725	191179	<u>168785</u> 84700	<u>1432,4400</u> 547,2600	<u>1783,39</u> 681,34	
2	С147-4-20	Стрижнева арматура А-III, діаметр 20 мм	100кг	48,85	<u>3303,18</u>	-	161360	-	-	-	-	
3	КБ15-47-2	Штукатурення стін по бетону сумішами з механізованим нанесенням суміші штукатурними станціями потужністю 5,5 кВт, продуктивністю 5-85 л/хв, при товщині шару штукатурки до 20 мм	100м ²	12,45	<u>11483,74</u> 10904,23	<u>579,51</u> 130,54	142973	135758	<u>7215</u> 1625	<u>95,3000</u> 1,1527	<u>1186,49</u> 14,35	
4	С111-1891-1 варіант 1	Суміші вогнезахисні «Неоспрей»	кг	5450	<u>7,45</u>	-	40603	-	-	-	-	
Разом прямі витрати по кошторису								1080661	326937	<u>176000</u> 86325		<u>2969,88</u> 695,69
Разом будівельні роботи, грн.								1080661				
в тому числі:												
вартість матеріалів, виробів та комплектів, грн.								577724				
всього заробітна плата, грн.								413262				
Загальновиробничі витрати, грн.								217141				
трудомісткість в загальновиробничих витратах, люд.год.								439,87				
заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн.								75675				
Всього будівельні роботи, грн.								1297802				
Всього по кошторису								1297802				
Кошторисна трудомісткість, люд.год.								4105,44				
Кошторисна заробітна плата, грн.								488937				