

ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

ЧЕРКАСЬКИЙ ІНСТИТУТ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ ІМЕНІ ГЕРОЇВ ЧОРНОБИЛЯ
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

НУЯНЗІН ОЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ

УДК 614.841.45

ДИСЕРТАЦІЯ

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

21.06.02 – пожежна безпека
(261 – пожежна безпека)

Подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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

Олександр НУЯНЗІН

Перший примірник дисертації є
ідентичний за змістом з усіма іншими
примірниками дисертації

Вчений секретар



канд. техн. наук
Дмитро КОБИЛКІН

АНОТАЦІЯ

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

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

Для визначення меж вогнестійкості в умовах сучасності застосовують: натурні вогневі випробування, метод випробувань у спеціальних вогневих випробувальних печах, експериментально-розрахункові та розрахункові методи. Проте, натурні вогневі випробування не є рентабельними та проводяться надзвичайно зрідка, навіть у найрозвиненіших країнах. Вогневі випробування та параметри сучасних випробувальних установок далекі від досконалості, оскільки існують похибки, внаслідок того, що управління паливною системою та конфігурація вогневих печей не забезпечують повну відповідність умов проведення експерименту вимогам стандартів у даній галузі. Крім того великогабаритні печі – це неекологічно, трудомістко та не завжди економічно доцільно. Розрахункові методи не здатні забезпечити необхідну точність, так як неможливо врахувати особливості поведінки багатокомпонентного матеріалу будівельних конструкцій при нагріванні.

За результатами даної роботи було науково обґрунтовано та створено експериментально-розрахункову систему оцінки вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій, що враховує сумісну дію силових та температурних навантажень, за рахунок поєднання експериментальних досліджень з температурного впливу на малогабаритні фрагменти елементів цих конструкцій у спеціальних універсальних малогабаритних модульних вогневих установках та розрахункових методик інтерпретації експериментальних результатів, математичних моделей, що описують напружено-деформований стан

несучих залізобетонних будівельних конструкцій під впливом стандартного температурного режиму пожежі та враховує реальні розміри конструкцій.

Обґрунтовано конфігурацію, конструктивні параметри та розроблено ескізи компактної модульної вогневої установки, що здатна забезпечити відтворюваність результатів теплового впливу на всі основні види несучих залізобетонних конструкцій, що дозволило створити методики проведення експериментальних досліджень зразків. Встановлено закономірність залежності дисперсії температур у камері вогневої печі від об'єму її камери, відстань від пальників до поверхні досліджуваного фрагменту несучої залізобетонної будівельної конструкції та висоти на якій знаходиться отвір для виходу продуктів горіння, що дозволило створити конфігурацію універсальної експериментальної установки для проведення вогневих випробувань та побудувати її на базі навчального закладу.

В процесі роботи проведено 12 вогневих експериментальних досліджень впливу стандартного температурного режиму пожежі на фрагменти несучих залізобетонних будівельних конструкцій (3 експерименти для кожного з видів конструкцій), під час яких спостерігались характерні для залізобетону процеси виділення вологи та пари. Було отримано дані щодо прогрівання всіх необхідних даних для проведення розрахункової частини. Підтверджено гіпотезу щодо відтворюваності та достовірності результатів за допомогою перевірки адекватності експериментальних даних шляхом обчислення критеріїв адекватності та визначення відносної похибки між отриманими результатами. Збіжність отриманих даних між собою склала: для плити – 4,0 %; для стіни – 3,6 %; для колони – 4,0 %; для балки – 7,9 %.

У процесі роботи визначено та обґрунтовано обчислювальні алгоритми інтерполяції для відновлення температурних полів у несучих залізобетонних будівельних конструкціях за показниками температури в певних точках всередині конструкцій під час вогневих випробувань, що дозволило визначити більш ефективну схему розташування термопар у перерізах фрагментів несучих залізобетонних будівельних конструкцій.

Було удосконалено науково-методичну базу у галузі пожежної безпеки на будівельних об'єктах для більш точного оцінюванні вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій, шляхом оптимізації елементів загальної системи та спрощення засобів проведення вогневих випробувань за рахунок використання малогабаритних модульних вогневих печей, що забезпечують відтворюваність експериментальних досліджень.

Набуло подальшого розвитку застосування експериментально-розрахункових методів шляхом врахування зміни напружено-деформованого стану залізобетону під впливом сумісної дії механічних та теплових навантажень, за рахунок поєднання експериментальних досліджень фрагментів несучих залізобетонних будівельних конструкцій та перенесення результатів на реальні розміри навантажених елементів за допомогою розрахунків. Було розширено методичну базу оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій без використання механічного навантаження в процесі проведення вогневих випробувань.

Практична цінність досліджень полягає у розробці експериментально-розрахункової системи оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій шляхом поєднання проведення вогневих випробувань в малогабаритних модульних установках без навантаження та розрахункових методик, що його враховує, і, як результат має меншу вартість і трудомісткість у порівнянні існуючими методами.

У першому розділі «Переваги й недоліки сучасних підходів до оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій» проаналізовано сучасні підходи до оцінювання вогнестійкості елементів будівельних конструкцій та окреслено актуальні наукові напрями. Схарактеризовано переваги й недоліки підходів до оцінювання вогнестійкості. Використання фрагментів зразків для випробувань за допомогою експериментальних методів аргументувало необхідність додаткового розрахунку реальних розмірів конструкцій. У разі застосування розрахункових методів неможливо охопити всі особливості виготовлення конструкцій та специфіку матеріалів, що входять до складу

залізобетону. Серйозним недоліком є відсутність єдиних вимог до експериментального обладнання. Для реалізації режиму випробувань необхідно зважати на граничні ефекти: тертя торців зразків, вплив тріщинуватої структури зразка, вплив нерівномірності нагріву та ін.

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

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

У четвертому розділі «Розроблення конструкції малогабаритної установки для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції» підготовлено ескіз та описано процес створення реальної установки для реалізації експериментальної частини загальної системи оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій під впливом стандартного температурного режиму пожежі, що здатна забезпечити високий ступінь відтворюваності експериментальних даних, а також обґрунтовано методики проведення експериментів із нагрівання кожного виду малогабаритних фрагментів залізобетонних будівельних конструкцій за стандартним

температурним режимом пожежі без механічного навантаження. З'ясовано необхідні мінімальні розміри зразків та способи установлення їх у камеру печі.

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

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

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

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

Ефективність розробленої системи методів експериментально-розрахункового оцінювання межі вогнестійкості, порівняно з розрахунковими методами, аргументована використанням і нагріванням реальних будівельних

матеріалів, із яких виготовляють фрагменти конструкцій. Це дає змогу уникнути похибки щодо усереднення значень коефіцієнтів прогріву конструкції під час розрахунків.

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

SUMMARY

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

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

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

To determine the limits of fire resistance in modern conditions, the following are used: full-scale fire tests, the method of tests in special fire test furnaces, experimental-calculation and calculation methods. However, full-scale fire tests are not cost-effective and are extremely rare, even in the most developed countries. Fire tests and parameters of modern test facilities are far from perfect, as there are errors due to the fact that the control of the fuel system and the configuration of the fire furnaces do not ensure full

compliance of the conditions of the experiment with the requirements of the standards in this field. In addition, large-sized furnaces are not environmentally friendly, labor-intensive and not always economically feasible. Calculation methods are not able to provide the necessary accuracy, since it is impossible to take into account the characteristics of the behavior of multi-composite material of building structures when heated.

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

The configuration, design parameters were substantiated, and sketches of a compact fire installation able to ensure the reproducibility of the results of thermal effects on all main types of load-bearing reinforced concrete structures were developed, which made it possible to create methods for conducting experimental studies of samples. The regularity of the dependence of the temperature dispersion in the chamber of the fire furnace on the volume of its chamber, the distance from the burners to the surface of the investigated fragment of the load-bearing reinforced concrete building structure and the height at which the opening for the exit of combustion products is located was established, which made it possible to create a configuration of a universal modular experimental installation for conducting fire tests and build it on the basis of an educational institution.

In the course of the work, 12 fire experimental studies of the influence of the standard fire temperature regime on fragments of load-bearing reinforced concrete building structures were conducted (3 experiments for each type of structure), during

which the processes of moisture and steam release characteristic of reinforced concrete were observed. The hypothesis regarding the reproducibility and reliability of the results was confirmed by checking the adequacy of the experimental data by calculating the adequacy criteria and determining the relative error between the obtained results. The convergence of the obtained data was: for the slab – 4.0%; for the wall – 3.6%; for the column – 4.0%; for the beam - 7.9%.

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

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

The use of experimental and calculation methods was further developed by taking into account the change in the stress-deformed state of reinforced concrete under the influence of the combined action of mechanical and thermal loads, due to the combination of experimental studies of fragments of load-bearing reinforced concrete building structures and transferring the results to the real dimensions of the loaded elements with the help of calculations. The methodical basis for evaluating the fire resistance of load-bearing reinforced concrete building structures without the use of mechanical load during fire tests was expanded.

The practical value of the research lies in the development of an experimental-calculation system for evaluating the fire resistance of load-bearing reinforced concrete building structures by combining fire tests in small-sized modular installations without

load and calculation methods that take it into account, and as a result has a lower cost and labor intensity compared to existing methods.

In the first chapter "Advantages and disadvantages of modern approaches to assessing the fire resistance of load-bearing reinforced concrete building structures" modern approaches to assessing the fire resistance of elements of building structures are analyzed and current scientific directions are outlined. The advantages and disadvantages of fire resistance evaluation approaches are characterized. The use of fragments of samples for testing using experimental methods argued the need for additional calculation of the real dimensions of structures. In the case of applying calculation methods, it is impossible to cover all the features of construction manufacturing and the specifics of materials included in the composition of reinforced concrete. A serious drawback is the lack of uniform requirements for experimental equipment. To implement the test regime, it is necessary to take into account the marginal effects: friction of the ends of the samples, the effect of the cracked structure of the sample, the effect of uneven heating, etc.

In the second chapter "Approximation of temperature distributions of point temperature measurements in the elements of building structures during fire resistance assessment" the patterns of changes in temperature fields in cross-sections of load-bearing reinforced concrete building structures are investigated, the interpolation schemes of temperature distributions for the main load-bearing building structures are substantiated. It is concluded that they are a key transition from point measurements during experiments and reproduction of the general picture during calculation, and also unite the system into a single whole. The conditions for calculation data to reproduce the results obtained as a result of real heating of structures are outlined.

In the third chapter "Investigation of regularities of influence of design parameters of the furnace on thermal processes during fire tests of building structures" the parameters of the fire furnace chamber and placement of its key elements are substantiated. The regularities of the dependence of the temperature dispersion in the chamber of the fire furnace on the volume of its chamber, the distance from the burners to the surface of the investigated fragment of the load-bearing reinforced concrete

building structure, and the height at which the opening for the exit of combustion products is located.

In the fourth chapter "Development of the design of a small-sized installation for the study of the thermal effect of fire on building structures", a sketch is prepared and the process of creating a real installation for the implementation of the experimental part of the general system for evaluating the fire resistance of load-bearing reinforced concrete building structures under the influence of the standard temperature regime of fire, which is able to ensure a high degree of reproducibility of experimental data is described, as well as the methods of conducting experiments on heating each type of small-sized fragments of reinforced concrete building structures according to the standard fire temperature regime without mechanical load are substantiated. The necessary minimum dimensions of the samples and methods of their installation in the furnace chamber have been clarified.

In the fifth chapter "Results of experimental studies of the thermal effect of fire on fragments of elements of reinforced concrete building structures" according to the developed methods 12 fire experimental studies of the effect of the standard fire temperature regime on small-sized fragments of load-bearing reinforced concrete building structures (3 for each type of structure) without mechanical load were carried out.

The sixth chapter "Justification of the set of methods for assessing the fire resistance limit of building structures based on experimental data" presents a set of methods for calculating the load-bearing capacity of elements of reinforced concrete building structures based on the results of restoration of temperature fields in their sections, which makes it possible to estimate the fire resistance limit of load-bearing building structures more accurately than existing methods (by 9.5% for walls; by 3% for slabs; by 9.5% for beams and by 8.3% for columns).

In the seventh chapter "The system for evaluating the fire resistance of load-bearing elements of reinforced concrete building structures using small-sized fire furnaces" scientific results are summarized, a system for evaluating the fire resistance of load-bearing reinforced concrete building structures is created, which takes into account

the joint effect of mechanical and thermal load, and therefore contributes to the solution of the problem of ensuring normative time of fire resistance under the influence of the temperature regime of the fire.

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

The effectiveness of the developed system of methods for experimental and calculation evaluation of the fire resistance limit, compared to calculation methods, is justified by the use and heating of real building materials from which fragments of structures are made. This makes it possible to avoid an error in averaging the values of the heating coefficients of the structure during calculations.

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

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

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

1. **Nuianzin O.**, Pozdieiev S., Hora V., Shvydenko A., Samchenko T. Cable tunnels temperature fire mode experimental study. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Т. 3. Р. 21–28. (Scopus Q2).

2. Pozdieiev S., **Nuianzin O.**, Binetska O., Borsuk O., Shvydenko A., Alimov B. Temperature effect on the thermal-physical properties of fire-protective mineral wool cladding of steel structures under the conditions of fire resistance tests.

Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Т. 4 (12–106). Р. 39–45. (Scopus Q2).

3. Pozdieiev S., Nizhnyk V., Feshchuk Y., Nekora V., **Nuianzin O.**, Shnal T. Investigation of the influence of the configuration of the fire furnace chamber on the temperature regime during the implementation of tests for fire resistance. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 4 (1), 112. Р. 34–40. (Scopus Q2).

4. **Nuianzin O.** Pozdieiev S., Sidnei S., Kostenko T., Borysova A., Samchenko T. Increasing the Efficiency and Environmental Friendliness of Fire Resistance Assessment Tools for Load-Bearing Reinforced Concrete Building Structures. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2023. №4. Р.138–146. (Scopus Q3).

Статті в наукових періодичних виданнях інших держав

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

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

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

Статті у наукових виданнях, включених до

Переліку наукових фахових видань України

8. **Нуянзін О. М.**, Некора О. В., Сідней С. О. Аналіз існуючих математичних моделей тепломасообміну у камерах вогневих печей установок для

випробувань на вогнестійкість несучих стін. *Збірник наукових праць «Пожежна безпека: теорія і практика»*. Черкаси, 2014. № 18. С. 13–18.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

21. Поздєєв С. В., **Нуянзін О. М.**, Сідней С. О., Новгородченко А. Ю., Борсук О. В. Дослідження нагрівання сталевих двотаврових стержнів із мінераловатним вогнезахисним облицюванням в умовах стандартного температурного режиму пожежі. *Геотехнічна механіка*. 2020. № 152. С. 116–126.

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

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

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

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

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

Патенти на корисну модель

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

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

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

Монографії

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

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

Статті, які додатково відображають наукові результати дисертації

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

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

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

Наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації

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

36. **Нуянзін О. М.**, Поздєєв С. В., Некора О. В., Нешпор О. В. Вплив дисперсії температур на обігрівальних поверхнях залізобетонних плит на їхню

межу вогнестійкості. *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції: Надзвичайні ситуації безпека та захист*, м. Черкаси, 2014. С. 86–87.

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

38. **Нуянзін О. М.**, Поздєєв С. В., Сідней С. О., Федченко І. В. Вплив конструктивних особливостей вогневих печей на достовірність результатів випробувань стін на вогнестійкість. *Матеріали 17 Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників*, м. Київ, 2015. С. 282–284.

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

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

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

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

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

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

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

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

47. **Нуянзін О. М.**, Поздєєв С. В., Кришталь М. А. Конструкція горизонтальної вогневої печі для забезпечення достовірності результатів випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій. *Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку: матеріали 19 Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників*, м. Київ, 2017. С. 318–320.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

62. **Нуянзін О. М.**, Поздєєв С. В., Некора О. В., Борсук О. В. Оцінка межі вогнестійкості сталеві балки при втраті цілісності вогнезахисного покриття.

Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми надзвичайних ситуацій». Харків, 2021. С. 45–46.

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

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

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

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

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

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

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

ЗМІСТ

ВСТУП	29
РОЗДІЛ 1. ПЕРЕВАГИ Й НЕДОЛІКИ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕСУЧИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ	45
1.1. Опис сучасних підходів до нормування вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій	45
1.2. Аналіз методів прогнозування вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій	59
1.2.1. Експериментальний підхід до прогнозування вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій	59
1.2.2. Розрахунковий підхід до прогнозування вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій.	69
1.2.3. Експериментально-розрахунковий підхід до прогнозування вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій	75
1.3. Перспективи створення нового експериментально-розрахункового методу прогнозування вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій	80
Висновки до розділу 1	85
РОЗДІЛ 2. АПРОКСИМАЦІЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ РОЗПОДІЛІВ ТОЧКОВИХ ЗАМІРІВ ТЕМПЕРАТУРИ В ЕЛЕМЕНТАХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІД ЧАС ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ	88
2.1. Загальні відомості про методи інтерполяції	88
2.2. Апроксимація температурних розподілень за лініями контрольних точок у перерізах залізобетонних елементів за одностороннього теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі	89
2.3. Апроксимація температурних розподілень залізобетонних елементів за чотирьохстороннього теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі	98

2.4. Апроксимація температурних розподілень залізобетонних елементів за трьохстороннього теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі	111
Висновки до розділу 2	126
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЕЧІ НА ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ ПІД ЧАС ВОГНЕВИХ ВИПРОБУВАНЬ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ	129
3.1. Обґрунтування вибору програмного комплексу та засобів реалізації досліджень	129
3.2. Аналітичне дослідження тепломасообміну в камері печі для визначення теплового впливу пожежі на будівельні конструкції	132
3.3. Варіація факторів для оцінювання рівномірності прогріву камери печі	139
3.4. Уточнені дослідження якості прогрівання камер печей	144
3.5. Результати моделювання процесу нагрівання у вибраних конфігураціях	150
3.6. Результати моделювання процесу нагрівання поверхонь основних елементів залізобетонних будівельних конструкцій	153
3.7. Висновки до розділу 3	160
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ МАЛОГАБАРИТНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ НА БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ	163
4.1. Загальні характеристики малогабаритної вогневої установки	163
4.2. Результати та аналіз тестових запусків печі. Удосконалення конструктивних елементів установки	175
4.2.1. Мета та завдання тестових запусків	175
4.2.2. Нормативна база	175
4.2.3. Місце та умови проведення випробувань	176
4.2.4. Методика випробувань	176
4.2.5. Засоби вимірювальної техніки	179

4.2.6. Аналіз результатів тестового запуску № 1	181
4.2.7. Аналіз результатів тестового запуску № 2	185
4.2.8. Аналіз результатів тестового запуску № 3	189
4.3. Обґрунтування методик експериментальних досліджень несучих залізобетонних будівельних конструкцій	193
4.3.1. Методика випробування несучих і самонесучих стін	193
4.3.2. Методика випробування несучих залізобетонних плит	197
4.3.3. Методика випробування несучих залізобетонних колон	201
4.3.4. Методика випробування несучих залізобетонних балок	205
Висновки до розділу 4	209
РОЗДІЛ 5. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕПЛОВОГО ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ НА ФРАГМЕНТИ ЕЛЕМЕНТІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ	212
5.1. Результати експериментальних досліджень із нагрівання фрагментів залізобетонних стін	212
5.1.1. Об'єкти випробування	212
5.1.2. Нормативна база	213
5.1.3. Мета випробувань	214
5.1.4. Місце та умови проведення випробувань	214
5.1.5. Методика випробувань	214
5.1.6. Засоби вимірювальної техніки	216
5.1.7. Хід випробувань	220
5.1.8. Результати випробувань	222
5.2. Результати експериментальних досліджень із нагрівання фрагментів залізобетонних плит	225
5.2.1. Нормативна база	225
5.2.2. Мета випробувань	227
5.2.3. Мета випробувань	227
5.2.4. Місце та умови проведення випробувань	227
5.2.5. Методика випробувань	228
5.2.6. Засоби вимірювальної техніки	229

5.2.7. Хід випробування	231
5.2.8. Результати випробувань	232
5.3. Результати експериментальних досліджень із нагрівання фрагментів залізобетонних колон	235
5.3.1. Об'єкти випробування	235
5.3.2. Нормативна база	237
5.3.3. Мета випробувань	237
5.3.4. Місце та умови проведення випробувань	237
5.3.5. Методика випробувань	238
5.3.6. Засоби вимірювальної техніки	239
5.3.7. Хід випробування	241
5.3.8. Результати випробувань	242
5.4. Випробування балки	244
5.4.1. Об'єкти випробування	244
5.4.2. Нормативна база	245
5.4.3. Мета випробувань	246
5.4.4. Місце та умови проведення випробувань	246
5.4.5. Методика випробувань	246
5.4.6. Засоби вимірювальної техніки	248
5.4.7. Хід випробування	249
5.4.8. Результати випробувань	250
5.5. Верифікація експериментальних даних	252
5.5.1. Перевірка адекватності під час випробування стін	253
5.5.2. Перевірка адекватності під час випробування плит	256
5.5.3. Перевірка адекватності під час випробування колон	257
5.5.4. Перевірка адекватності під час випробування балок	259
5.6. Висновки до розділу 5	260
РОЗДІЛ 6. ОБҐРУНТУВАННЯ КОМПЛЕКСУ МЕТОДИК ОЦІНЮВАННЯ МЕЖІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ	263
6.1. Методики оброблення експериментальних даних для оцінювання	

межі вогнестійкості залізобетонних балок	263
6.1.1. Адекватність розрахунку температурного поля у фрагментах балок за результатами експериментальних досліджень	263
6.1.2 Оцінювання межі вогнестійкості залізобетонної балки за результатами вогневих випробувань без механічного навантаження	265
6.1.3 Результати використання запропонованого методу	275
6.1.4 Порівняльний аналіз оцінювання межі вогнестійкості балки	280
6.2. Методики оброблення експериментальних даних для оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних плит	282
6.2.1. Адекватність розрахунку температурного поля у фрагментах плит за результатами експериментальних досліджень	282
6.2.2 Оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних плит за результатами вогневих випробувань без механічного навантаження	284
6.2.3 Результати використання запропонованого методу	292
6.2.4 Порівняльний аналіз оцінювання межі вогнестійкості плити	295
6.3. Методики оброблення експериментальних даних для оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних колон	297
6.3.1. Адекватність розрахунку температурного поля у фрагментах колон за результатами експериментальних досліджень	297
6.3.2 Оцінювання межі вогнестійкості залізобетонної колони за результатами вогневих випробувань без механічного навантаження	303
6.3.3 Результати використання запропонованого методу	309
6.3.4 Порівняльний аналіз оцінювання межі вогнестійкості колони	313
6.4. Методики оброблення експериментальних даних для оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних стін	315
6.4.1. Адекватність розрахунку температурного поля в стінових фрагментах за результатами експериментальних досліджень	315
6.4.2 Оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних стін за результатами вогневих випробувань без механічного навантаження	318
6.1.3 Результати використання запропонованого методу	326
6.4.4 Порівняльний аналіз оцінювання межі вогнестійкості стіни	330

Висновки до розділу 6	332
РОЗДІЛ 7. СИСТЕМА ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕСУЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МАЛОГАБАРИТНИХ ВОГНЕВИХ ПЕЧЕЙ	334
7.1. Елементи системи, зв'язок та відношення між ними	334
7.2. Засоби випробувальної техніки та умови виготовлення зразків	336
7.3. Умови виготовлення та підготовки фрагментів елементів залізобетонних конструкцій для випробування в малогабаритних печах	339
7.4. Встановлення вимірювальної арматури та засоби фіксації результатів випробувань	341
7.5. Умови проведення експериментальних досліджень із теплового впливу пожежі на фрагменти елементів конструкцій у малогабаритних печах	346
7.6. Оброблення експериментальних даних	349
7.7. Алгоритм проведення розрахункової частини та необхідна інформація для оцінювання вогнестійкості	352
7.8. Перевірка адекватності та аналіз отриманих результатів	356
Висновки до розділу 7	357
ВИСНОВКИ	359
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	362
ДОДАТКИ	401
ДОДАТОК А. Список публікацій здобувача за темою дисертації	401
ДОДАТОК Б. Відомості про апробацію результатів дисертації	412
ДОДАТОК В. Акти впровадження результатів дисертації	413

ВСТУП

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

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

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

Проблеми оцінювання вогнестійкості залізобетонних конструкцій поставали предметом дослідження в працях багатьох учених (А. Беліков, В. Ковалишин,

В. Костенко, П. Круковський, В. Ніжник, С. Поздєєв, М. Семерак, В. Bartelemi, G. Kruppa, T. Harmathy, T. Lie та ін.). Водночас у наукових дослідженнях бракує уваги щодо обґрунтування специфіки створення системи або універсального експериментально-розрахункового методу оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій, який би зважав на особливості виготовлення несучої залізобетонної будівельної конструкції, умов її подальшої роботи та сприяв точності розрахункових даних. Необхідно досягти консенсусу між експериментами й подальшими розрахунками. Серед актуальних завдань галузі – розроблення спеціальних портативних засобів, які допоможуть брати до уваги особливості багатокомпонентного матеріалу залізобетону й розрахункові методики, що охоплюють відомості про навантаження та габарити конструкцій. Залучення отриманих даних оптимізуватиме ефективність випробувань з оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій для гарантування необхідного часу евакуації та проведення пошуково-рятувальних робіт.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація підготовлена відповідно до основних напрямів наукової діяльності ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України у 2016 – 2020 та 2021 – 2025 роках, згідно з «Угодою про асоціацію між Україною та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами», що ратифікована на підставі Закону України № 1678-VII від 16.09.2014; «Стратегією розвитку системи технічного регулювання на період до 2025 року», затвердженою розпорядженням Кабінету Міністрів України від 22.09.2021 № 1145-р; замовленнями Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям ДСНС України та Інституту на науково-дослідницькі роботи, виконані в ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України: «Розробка розрахункового методу оцінки межі вогнестійкості будівельних конструкцій кабельних тунелів» (ДР № 00119U001103), «Удосконалення експериментально-розрахункового методу оцінки вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій за результатами

випробувань їх малогабаритних фрагментів» (ДР № 0121U109145), за участі здобувача як керівника. Результати пошуку використано в дисертації, а також у захищених дисертаціях Олени Борсук на здобуття ступеня кандидата наук («Удосконалення методу розрахункової оцінки вогнестійкості сталевих балок із вогнезахисним мінераловатним облицюванням») і Тараса Самченка на здобуття ступеня доктора філософії («Дослідження вогнестійкості огорожувальних конструкцій кабельних тунелів за умов реальних пожеж»), де автор був науковим керівником.

Ідея роботи полягає в розробленні нової системи визначення межі вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій для гарантування нормативного часу їхньої стійкості в разі пожежі через створення та наукове обґрунтування комплексу експериментально-розрахункових методик оцінювання вогнестійкості елементів несучих залізобетонних будівельних конструкцій на основі вогневих випробувань їхніх фрагментів у малогабаритних модульних вогневих печах без навантаження, а також реальних габаритів елементів на етапі розрахунку.

Сутність системи полягає в проведенні вогневих випробувань фрагментів елементів несучих залізобетонних конструкцій за допомогою розробленої спеціальної конструкції малогабаритної вогневої установки (печі). Обґрунтовано розташування та кількість місць заміру температури всередині будівельних конструкцій. За точковими значеннями температури потрібно розрахувати температурні поля. З огляду на поля, для кожного виду елементів конструкції розроблено методику на основі розрахунку, зважаючи на навантаження, за яким окремо визначають межу вогнестійкості для будівельної конструкції реальних розмірів. Система поєднує методи експериментальних і розрахункових досліджень для основних видів несучих залізобетонних будівельних конструкцій, стане більш ефективною за випробування на вогнестійкість, а також за інші методи, оскільки є менш трудомісткою, більш екологічною та точнішою. У

системі взято до уваги навантаження в процесі математичних розрахунків, особливості багатокомпонентного матеріалу (залізобетону) у ході вогневих експериментів.

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

Досягнення сформульованої мети передбачає розв'язання таких завдань:

- проаналізувати сучасні підходи до оцінювання вогнестійкості елементів будівельних конструкцій та окреслити актуальні напрями досліджень;
- виявити закономірності зміни температурних полів у перерізах елементів залізобетонних будівельних конструкцій в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі, обґрунтувати на основі зазначених закономірностей методики визначення температурних розподілень за результатами точкових вимірювань температури у внутрішніх шарах елементів цих конструкцій за умов теплового впливу пожежі;
- розробити математичні моделі теплової печі для випробувань фрагментів елементів залізобетонних будівельних конструкцій, виявити закономірності впливу конструктивних параметрів печі на теплові процеси під час вогневих випробувань, обґрунтувати конструктивні параметри печі, за яких відбуваються найбільш якісні вогневі випробування, як перший елемент створення системи оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій;
- розробити й обґрунтувати методику експериментальних досліджень системи оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій, що полягає в визначенні температурного відклику цих конструкцій у разі

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

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

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

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

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

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

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

Методи дослідження. Теоретичні дослідження проведено на основі систем диференціальних рівнянь неперервних середовищ типу рівнянь Нав'є – Стокса, рівнянь теплопровідності та напружено-деформованого стану залізобетону в умовах нагріву під час пожежі, рівнянь теплопровідності Фур'є. Для розв'язування рівнянь у роботі використано метод кінцевих (граничних) елементів, метод кінцевих різниць, оптимізаційні методи, а також методи

статистичного оброблення експериментальних і розрахункових даних. Експериментальні дослідження виконано за допомогою створеної універсальної малогабаритної вогневої випробувальної установки.

Наукова новизна отриманих результатів. Унаслідок дослідницького пошуку запропоновано нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності забезпечують вирішення актуальної проблеми гарантування нормативного часу межі вогнестійкості будівельних конструкцій під впливом температурного режиму пожежі через розроблення нової експериментально-розрахункової системи її оцінювання. Наукова новизна аргументована описом закономірностей відтворення температурних полів та розрахунку на їхній основі міцності стиснених елементів несучих залізобетонних будівельних конструкцій за спільного температурно-силового впливу на основі експериментальних випробувань їхніх малогабаритних фрагментів у компактних модульних вогневих печах.

Уперше досягнуто таких наукових результатів:

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

2) методами математичного моделювання виявлено закономірність та визначено залежності закономірності залежності дисперсії температур у камері вогневої печі (S_2) від об'єму її камери (V), відстані від пальників до поверхні

досліджуваного фрагменту несучої залізобетонної будівельної конструкції (1) та висоти, на якій розташований отвір для виходу продуктів горіння (h) у вигляді:

$$S_2 = 4221 + 4133 \cdot h - 2555 \cdot l - 1220 \cdot V - 800 \cdot V \cdot l - 5513 \cdot V \cdot h - 5150 \cdot l \cdot h + 7875$$

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

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

Удосконалено:

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

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

Набули подальшого розвитку такі положення:

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

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

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

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

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

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

Результати дослідження впроваджено в (Додаток В):

– діяльність ТОВ «Інженерно-проектно-виробнича компанія «Спецзахист» – розроблено й запропоновано низку новацій для оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій; пропозиції щодо вдосконалення стосуються поєднання експериментальних і розрахункових методів визначення вогнестійкості, здатні зменшити затрати, порівняно з випробуваннями вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій (акт упровадження від 14.02.2023);

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

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

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

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

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

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

Особистий внесок здобувача аргументований обґрунтованою актуалізацією науково-прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки, самостійним формулюванням мети й завдань, об'єкта та предмета дослідження, аналізом вітчизняних і закордонних джерел, удосконаленням та розробленням дослідницьких методів і методик, проведенням експериментальних досліджень, а також обробленням отриманих результатів, систематизованим підбиттям підсумків. Дисертація є самостійною роботою автора; усі положення, запропоновані до захисту, результати їх упровадження описано в працях (Додаток А).

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача такий: [41] – експериментальні випробування з моделювання температурних режимів реальних пожеж у будівлях спеціального призначення, а також створено науково-обґрунтовану послідовність процедур з детальним вибором обладнання та зразків для випробувань з метою забезпечення достовірних експериментальних даних при дослідженні температурного режиму пожежі у закритих об'ємах; [283] – дослідження впливу небезпечних факторів пожежі на будівельні конструкції; опис на основі комп'ютерного моделювання впливу стандартного температурного режиму пожежі (за умов випробувань вогнестійкості) на несучі будівельні конструкції, а також розрахована відносна похибка між розрахунковими та експериментальними даними. Критерії Кохрена, Стьюдента та Фішера для результатів розрахунку температури у сталевих конструкціях із вогнезахисним мінераловатним облицюванням між розрахунковими та експериментальними даними мають величини, що не перевищують табличних значень; [88] – дослідження процесів тепломасообміну в камері вогневої печі, визначення параметрів внутрішнього простору, що суттєво впливають на температурний режим під час випробувань вогнестійкості; [214] – наукове обґрунтування можливості створити вогневу установку з параметрами, які забезпечать вищу екологічність проведення випробувань у порівнянні з великогабаритними печами; перевірено адекватність роботи запроєктованої установки методом комп'ютерного моделювання, а також доведено, що доцільно застосовувати природній газ у якості палива; [47] – моделювання поведінки будівельних конструкцій газгольдера за умови виникнення теплового потоку пожежі від сусіднього об'єкта; [93] – опис етапів будівництва й науково обґрунтована конфігурація малогабаритної вогневої випробувальної установки; [266] – аналіз моделей теплообміну, що можна використовувати для дослідження процесів усередині камер вогневих печей під час випробування вогнестійкості несучих стін; [267] – характеристика способу впливу конструктивних

особливостей камери печі на остаточний результат межі вогнестійкості; [268] – створення й характеристика тематичних моделей, які доцільно використовувати для дослідження тепломасообміну в камерах вогневих печей; [5] – зіставлення результатів оцінювання вогнестійкості несучих стін у разі рівномірного й нерівного прогрівання засобами комп'ютерної газодинаміки; [307] – обчислювальний експеримент з оцінювання рівномірності температурного поля по обігрівальній поверхні залізобетонних стін під час випробувань вогнестійкості в спеціальних установках; [7] – опис алгоритму створення комп'ютерних моделей вогневих печей, за допомогою яких досліджено вплив дисперсії температур по обігрівальній поверхні будівельних конструкцій на значення межі вогнестійкості; [308] – порівняльний аналіз здатності різних конфігурацій і дизайнів вогневих печей забезпечувати відтворюваність результатів випробувань вогнестійкості; [60] – аналіз отриманих результатів відповідно до моделювання процесу прогрівання в замкнених системах у разі дії зовнішніх чинників; [50] – дослідження впливу величини пожежного навантаження на температурний режим, що виникає в приміщеннях обмеженого об'єму; [51] – вивчення температурних режимів пожежі, що створюють у кабельних тунелях із різними геометричними параметрами, з'ясування впливу на значення межі вогнестійкості огорожувальних конструкцій, а також підготовка та проведення експериментальних досліджень для опису температурних режимів пожежі в закритих приміщеннях тунельного типу; обґрунтування факторів, що найсуттєвіше впливають на значення межі вогнестійкості будівельних конструкцій; [52] – окреслення чинників, які найбільшою мірою позначаються на температурному режимі пожежі в закритих приміщеннях тунельного типу; [265] – порівняння ефективності роботи комп'ютерних моделей, що імітують тепломасообмін у камерах печей та створені за допомогою різних програмних комплексів CFD; [8] – демонстрування алгоритму й особливостей моделювання моменту втрати несучої здатності балки; [9] – опис нагрівання будівельної сталі за умов стандартного температурного

режиму пожежі; [10] – дослідження ступеня впливу коефіцієнта перерізу й коефіцієнта навантаження несучої балки на час відшарування вогнезахисного облицювання; [12] – доведення доцільності розрахункового оцінювання класу вогнестійкості будівельних конструкцій, демонстрування алгоритму його використання; [277] – розроблено та охарактеризовано алгоритм оцінки межі вогнестійкості залізобетонної балки за результатами вогневих випробувань без механічного навантаження, що лягає в основу загальної методики оцінки межі вогнестійкості залізобетонної балки за результатами вогневих випробувань без механічного навантаження та врахування його на етапі розрахунку; [326] – представлення конфігурації камери вертикальної вогневої печі, що забезпечує рівномірний прогрів стін під час дослідження вогнестійкості; [309] – презентація результатів конфігурації універсальної малогабаритної вогневої установки, використовуваної в експериментальних дослідженнях; [213] – презентація результатів способу інтерполяції температурних розподілень у залізобетонних балках на основі вимірювань температури у визначених контрольних точках; [57] – окреслено фактори, що впливають на результати, отримані в ході оцінювання вогнестійкості конструкцій; проведення експерименту, аналіз результатів; [310] – опис комп'ютерних моделей вогневих печей і результатів оцінювання межі вогнестійкості несучих стін у моделях; [104] – перевірка адекватності створених моделей печей за допомогою методів математичної статистики та критеріїв; [49] – створення математичних моделей тепломасообміну в разі пожеж у спорудах тунельного типу й перевірка їхньої адекватності; [13] – опис методики та результатів реальних експериментів із нагрівання залізобетонної стіни в малогабаритній вогневій печі; [284] – аналіз нормативних документів України в галузі метрології; [301] – з'ясування залежності значення межі вогнестійкості залізобетонних плит від величини дисперсії температур під час нагрівання у вогневих печах; [198] – визначення критеріїв адекватності для верифікації математичних моделей; [271] – порівняння різних конфігурацій камер вогневих

печей; [272] – обґрунтування вибору вимірювальних приладів, що доцільно застосовувати для випробування вогнестійкості несучих стін; [273] – виклад алгоритму обчислюваного експерименту; [314] – вивчення рівномірності прогріву несучої стіни за різних умов; [312] – створення математичної моделі прогріву залізобетонної стіни та проведення обчислювального експерименту; [315] – дослідження рівномірності прогріву несучої стіни з важкого бетону; [317] – з'ясування особливостей тепломасообміну в камерах вогневих печей за допомогою комп'ютерного моделювання; [319] – аналіз ефективності роботи різних конфігурацій вогневих печей; [321] – розроблення кінцево-елементної моделі залізобетонної стіни та проведення обчислювального експерименту; [302] – аналіз результатів прогрівання горизонтальної вогневої печі; [42] – математичне моделювання, що вможливило вивчення впливу різних конфігурацій печей на значення вогнестійкості несучих стін; [43] – визначення реальних температурних режимів пожеж залежно від зовнішніх умов і пожежного навантаження; [291] – осмислення вимог нормативних документів у сфері вогнестійкості будівельних конструкцій; [91] – створення комп'ютерних моделей, що відображають прогрів і зміну несучої здатності несучих стін у разі нерівномірного прогріву; [303] – аналіз математичних моделей, які доцільно використовувати для дослідження тепломасообміну під час пожежі, характеристика негативних наслідків таких умов нагрівання; [44] – математичне моделювання впливу різних температурних режимів пожежі на несучу сталеву балку; [215] – підготовка зразків залізобетонних колон для зістарення в кліматичній камері; [217] – вивчення математичних моделей камер вогневих печей щодо їхньої рівномірності прогріву; [220] – створення математичної моделі сталевої балки та проведення обчислювального експерименту; [45] – розроблення прямокутних моделей закритих тунелів, моделювання горіння, що вможливили формування уявлень про аеродинаміку закритих прямокутних приміщень у разі появи теплових потоків унаслідок пожежі; [89] – вивчення поведінки сталених стержнів за впливу

стандартного температурного режиму пожежі, а також комп'ютерне моделювання поведінки несучих будівельних конструкцій стержневого типу (за різними геометричними й фізичними параметрами) під час їх нагрівання; [224] – алгоритмізація комп'ютерних моделей вогневих печей за допомогою сучасних програмних комплексів; [225] – опис результатів експериментальних досліджень нагрівання фрагменту залізобетонної конструкції; [61] – представлення результатів нагрівання залізобетонної плити; [227] – з'ясування особливостей прогрівання сталевих стержнів; [327] – виклад конструктивних особливостей малогабаритної вогневої установки для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції; [231] – аналіз експериментальних даних щодо нагрівання залізобетонної балки за умов пожежі; [232] – розрахунок адекватності результатів обчислювальних експериментів прогрівання сталевих стержнів; [328] – аналіз адекватності результатів обчислювальних експериментів прогрівання залізобетонних стін; [325] – представлення результатів експериментальних досліджень із нагрівання елементів залізобетонної стіни; [90] – аргументація максимальних значень навантаженої вертикальної будівельної конструкції без вогнезахисту в умовах пожежі, доведення необхідності ізоляції сталі від прямої дії вогню; [306] – проведення реального експерименту з нагрівання малогабаритного фрагменту стіни за стандартним температурним режимом пожежі, аналіз отриманих результатів. Праці [11; 14; 48] підготовлені самостійно.

Апробація результатів дисертації (Додаток Б). Основні результати досліджень представлено й успішно обговорено на міжнародних і національних науково-практичних конференціях: Всеукраїнська науково-практична конференція рятувальників «Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку» (м. Київ, 2014, 2015, 2016, 2017); Міжнародна науково-практична конференція «Надзвичайні ситуації безпека та захист» (м. Черкаси, 2014, 2015, 2016, 2020, 2021, 2022); VII Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку забезпечення безпеки

життєдіяльності» (м. Львів, 2015); Міжнародна науково-практична конференція «Прикладні аспекти техногенно-екологічної безпеки» (м. Харків, 2015); Міжнародна науково-практична конференція «Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації» (м. Львів, 2016); VII Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 2017); XVIII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering, production engineering and physics» (Czestochowa, 2017); VIII Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2017, 2018, 2021, 2022); Міжнародна науково-практична конференція «Енергоефективність на транспорті» (м. Харків, 2020); 9-та Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (м. Харків, 2021); International Scientific and Practical Conference «Problems of Emergency Situations» (Kharkiv, 2021, 2022).

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

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

РОЗДІЛ 1

ПЕРЕВАГИ Й НЕДОЛІКИ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕСУЧИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

1.1. Опис сучасних підходів до нормування вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій

Під поняттям вогнестійкості розуміють таку властивість виробів, матеріалів, конструкцій, будівель і споруд, що вможливорює опір дії вогню та високих температур, загорянню, деформації, сприяє збереженню несучих і захисних ознак. Межі вогнестійкості визначають через вогневі випробування за стандартною методикою, що виражене в часі [1; 2].

Несучі залізобетонні конструкції [3] вирізняються високою вогнестійкістю, можуть витримувати навантаження протягом тривалого часу пожежі [5–14], зберігають високу міцність і жорсткість. Водночас їх застосування, з огляду на описані властивості, пов'язане з великим навантаженням. У разі обвалення різних будівельних залізобетонних конструкцій унаслідок руйнування збитки можуть сягати найбільшого рівня [15–20]. Ідеться про потенційні людські жертви, втрату матеріальних цінностей, знищення будівельних конструкцій і споруд. Забезпечення необхідного терміну межі вогнестійкості не є самоціллю, вимоги до неї формуються залежно від типу об'єкта, кількості перебування людей, особливостей технологічних процесів тощо [21–25].

Найвища цінність – людське життя, тому вимоги до межі вогнестійкості окреслюють насамперед для того, щоб забезпечити евакуацію людей. Серед інших цілей варто назвати проведення рятувальними підрозділами пошуково-рятувальних робіт і збереження матеріальних цінностей [26–27].

Згідно з нормативною базою України [1–2; 28–35], вогнестійкість залізобетонних несучих конструкцій визначають за часом настання одного з трьох

граничних станів: втрата несучої здатності, втрата цілісності та / або втрата теплоізолювальної здатності. Названі граничні стани позначають літерами R, E та I. Граничний стан втрати несучої здатності залізобетонними конструкціями пов'язаний із втратою стійкості або повною руйнацією.

Ступені вогнестійкості залежать від рівня відповідальності та типу використаних будівельних конструкцій. У табл. 1.1 продемонстровано приклади застосованих будівельних конструкцій, з огляду на ступінь вогнестійкості [2].

Таблиця 1.1

Конструктивні характеристики будівель
залежно від ступеня вогнестійкості

Ступінь вогнестійкості	Конструктивні характеристики будівель
I	Будівлі з несучими каркасними конструкціями, що виготовлені з природних чи зі штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону, сталобетону та сталезалізобетону.
II	
III	Будівлі з несучими каркасними конструкціями з бетону, залізобетону, сталобетону, сталезалізобетону, природних або штучних кам'яних матеріалів і деревини, що зазнала вогне- та біозахисного оброблення.
IIIa	Будівлі з каркасними несучими конструкціями. Елементи каркасів виконані з металевих вогнезахисних елементів.
IIIб	Будівлі переважно з одним або з двома поверхами з каркасними несучими конструкціями. Елементи каркаса можуть бути виготовлені з вогнезахисного металу або з деревини, що пройшла вогнезахисне оброблення.
IV	Будівлі з несучими конструкціями з деревини із вогнезахистом або з інших горючих матеріалів, які захищені від дії вогню штукатуркою та іншими вогнезахисними матеріалами.
IVa	Будівлі переважно одноповерхові та двоповерхові з каркасними несучими конструкціями. Використовують металеві елементи каркаса з вогнезахистом.
V	Будівлі з несучих і захищених конструкцій, до яких не існує вимоги щодо меж вогнестійкості.

Для аналізу вогнестійкості використовують поняття фактичного й необхідного ступеня вогнестійкості елементів будівельних конструкцій. Необхідний ступінь вогнестійкості будівлі V_n визначають як мінімальний ступінь вогнестійкості, який має бути забезпечений згідно з вимогами нормативних документів [31–34].

Відповідно до стандартів України [1–2], необхідний ступінь вогнестійкості впливає на мінімальні межі вогнестійкості, з огляду на призначення будівель, поверховість, місткість, категорії виробництва щодо вибухопожежної небезпеки, наявність автоматичних установок пожежогасіння й інші чинники. У табл. 1.2 подано приклади визначення необхідної межі вогнестійкості залізобетонних плит різних будівель за їхнім функційним призначенням [1].

Таблиця 1.2

Необхідні межі вогнестійкості залізобетонних конструкцій залежно від типу будівель

Межа вогнестійкості	Призначення будівлі
180	Висотні суспільні, житлові (заввишки до 100 м). Паркінги, з'єднані з житловими, офісними та багатофункційними будівлями.
60	Виробничі, суспільні, житлові (понад 16 поверхів).
45	Виробничі, суспільні, житлові (до 16 поверхів).
45	Виробничі, суспільні (до 5 поверхів), житлові.
45	Суспільні (до 5 поверхів) школи, культурно-видовищні установи (на 1 поверх).
15	Суспільні (до 5 поверхів) школи, культурно-видовищні установи (на 1 поверх).
15	Виробничі, суспільні (до 2 поверхів).
15	Виробничі, суспільні (на 1 поверх).

Відповідність елементів будівельних конструкцій вимогам щодо вогнестійкості перевіряють через порівняння значення фактичної межі вогнестійкості та значення необхідної мінімальної межі вогнестійкості. За такого підходу мінімальні межі вогнестійкості визначити набагато простіше, ніж фактичні межі вогнестійкості. Фактичні межі вогнестійкості окреслюють у разі експериментальних досліджень, послуговуючись розрахунковими методами або методами, що поєднують обидва зазначені підходи в різному співвідношенні. Згідно з нормативною чинною базою [1–2; 28–35], у

визначенні фактичних меж вогнестійкості залізобетонних конструкцій надають перевагу вогневим випробуванням.

Через обвалення зігнутих залізобетонних елементів несучих конструкцій виникає найбільший ризик загибелі та травмування людей. Збитки досягають максимальних значень, оскільки в разі втрати несучої здатності зазнають руйнування технологічне оснащення та приміщення. Крім того, з'являються суттєві перешкоди для евакуації. На завалах необхідно діяти відповідно до протоколів пошуково-рятувальних робіт, тому що існує ризик повторного обвалення та / або зсувів наявного [31–35].

Зігнуті залізобетонні елементи, унаслідок дії високих температур, руйнуються з дробленням бетону в стиснутому шарі бетону та розтріскуванням у розтягнутому шарі, при цьому заголюється арматура. У граничному стані за високих температур несуча здатність залізобетонних конструкцій зумовлена несучою спроможністю бетону та внутрішніми сталевими й арматурними включеннями [36–40].

У масивних залізобетонних конструкціях у граничному стані, унаслідок нерівномірного прогріву перерізу, навантаження сприймається тільки в стиснутому шарі бетону, через це й відбувається дроблення.

Дослідження розвитку аварійних ситуацій і пов'язаних із ними пожеж у спорудах [41–53] засвідчило, що інтенсивність та тривалість залежать від типу й кількості пожежного навантаження, площі та конфігурації прорізів, наявності пожежної автоматики, інших чинників. Пожежа зазвичай має три стадії. перша стадія – початкова, коли температура газів у приміщенні не досягає 200°C. Уважають, що цей період не позначається на вогнестійкості елементів конструкцій. Друга стадія пов'язана зі швидким зростанням вигорання матеріалів за суттєвого збільшення тепловиділення, що призводить до підвищення температури в приміщенні й теплового впливу на елементи будівельних конструкцій. Третя стадія – це стадія зменшення температури. Оскільки температура якийсь час залишається досить високою, потрібно брати до уваги її вплив на конструкції.

Промовисті приклади дослідження стадій пожежі в температурно-часовому просторі запропоновано в наукових працях [55–57].

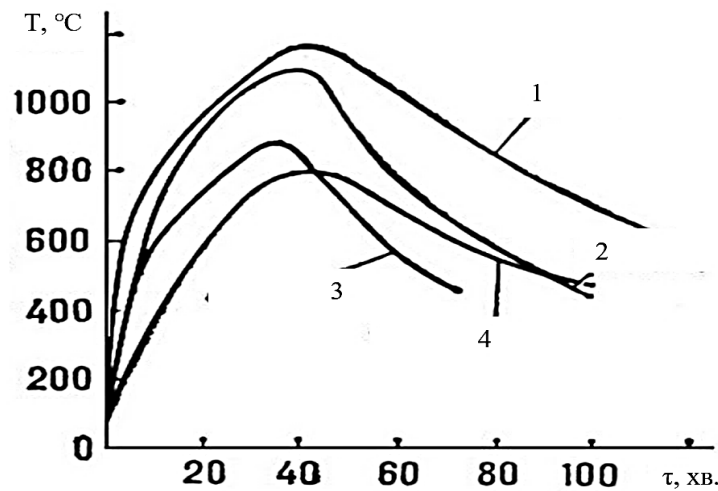


Рисунок 1.1. – Температурні режими пожежі в разі горіння різних матеріалів: 1 – каучук; 2 – гума; 3 – деревина; 4 – полімерна плівка

Відповідно до наукових розвідок, найбільш небезпечною є перша година пожежі, якщо підрозділи не мали змоги перейти до охолодження конструкцій. Майже в усіх випадках горіння твердих матеріалів досягає температурного апогею на 40 хвилині. Поступово температура осередку знижується, але це відбувається значно швидше, ніж охолодження залізобетону. Різде охолодження багатокомпонентних матеріалів може зумовити появу тріщин, тому безпечніше, щоб конструкція остигала повільно.

Температурні режими пожежі, запропоновані в нормативних документах, зважають на цей фактор, тому низхідна гілка відсутня в разі випробувань за стандартним температурним режимом. У будівлях спеціального призначення гілка спадання температури наявна, проте вони не є поширеними. На рисунку 1.2 відображено температурні режими під час пожежі, що виникають в аварійних ситуаціях, порівняно зі стандартним температурним режимом пожежі [57–63].

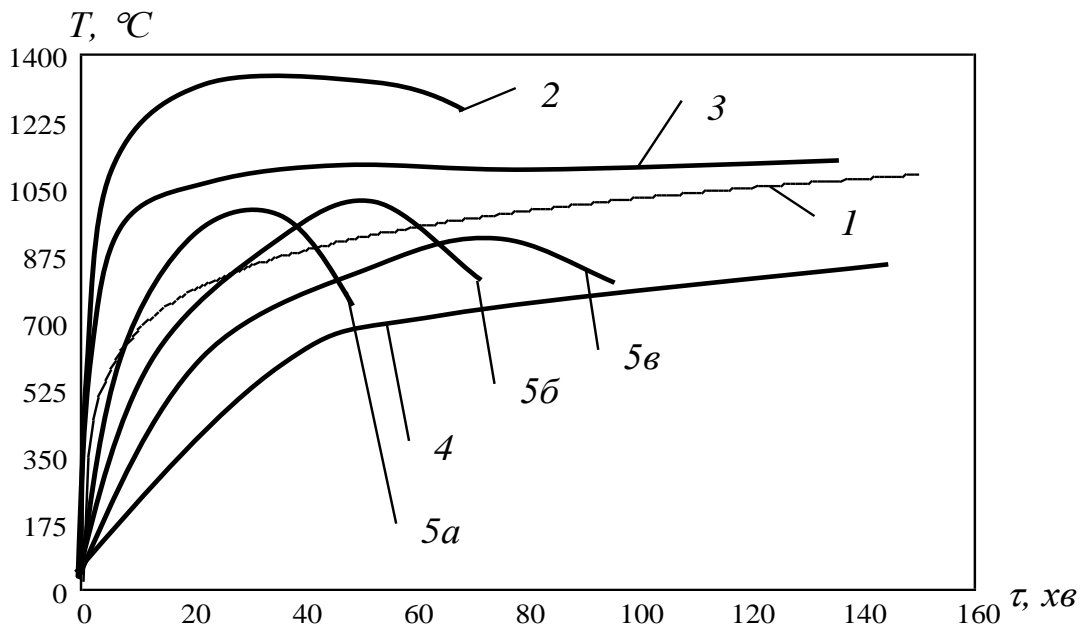


Рисунок 1.2. – Температурні режими аварійних ситуацій, пов’язаних із техногенними надзвичайними ситуаціями в приміщеннях будівель і споруд різного призначення: 1 – стандартна температурна крива пожежі; 2 – для пожеж у тунелях; 3 – для пожеж у будівлях нафтопереробної і хімічної промисловості; 4 – для пожеж у підвалах; 5 – режими пожеж у житлових приміщеннях із різними площами прорізів (від «а» до «в» площа прорізів зменшується від 2 м² до 1 м²) [57–63].

Цифрою 1 позначена стандартна температурна крива пожежі. Вогнестійкість залізобетонних конструкцій різних типів оцінюють в умовах, що усереднюють температурний вплив пожежі, з огляду на найбільш жорсткі умови. В основу всіх названих підходів покладено специфічні умови пожежі, що мають бути повністю увідповіднені з вимогами світових і вітчизняних стандартів [2]. Згідно з документами, основна умова – застосування температурного режиму (°C) пожежі, що визначають за функційною залежністю:

$$T_p = 20 + 345 \cdot \lg(8\tau + 1) \quad (1.1),$$

де час τ зафіксований у хв.

Така залежність характеризує лише один етап пожежі, що відтворює зростання температури в інтенсивному режимі. Ідеться про стадію вже розвинутої

пожежі з високою тепловою енергією, що не повністю відповідає реальній температурній кривій у разі пожеж [64–70]. Температурний режим затверджений у світі для відтворюваності стандартних експериментальних досліджень залізобетонних конструкцій в умовах високотемпературного впливу з використанням відкритого вогню.

Для більш точного відтворення температурних режимів пожежі, з огляду на особливості приміщення та всі стадії пожежі, автори праць [57–63] пропонують різні функційні залежності.

Таблиця 1.3

Температурні режими випробувань будівельних конструкцій на вогнестійкість

Режим пожежі	Вираз температурної залежності режиму пожежі
Стандартна температурна крива пожежі	$T_p(\tau) = 345 \cdot \lg(8\tau + 1) + T_0$
«Вуглеводнева» температурна крива пожежі	$T_p(\tau) = 1080[1 - 0,325 \exp(-0,176\tau) - 0,675 \exp(-2,5\tau) + 20] \quad (1.2)$
Температурна крива «пожежі, що тліє»	$T_p(\tau) = 154\tau^{0,25} + 20 \quad \text{при } 0 < \tau \leq 21;$ $T_p(\tau) = 345 \lg(8(\tau - 20) + 1) + 20 \quad \text{при } \tau > 21 \quad (1.3)$
Різні температурні режими для вогневих випробувань, чинні в різний час та в різних державах	$T_p(\tau) = 504\tau^{0,141}; \quad T_p(\tau) = 925 + 150 \ln \tau \quad (1.4)$ $T_p(\tau) = 20 + 22,2\sqrt{\tau} + 774[1 - \exp(-0,49\sqrt{\tau})] \quad (1.5)$ $T_p(\tau) = 524 + 10^{0,141 \lg \tau} \quad (1.6)$

У табл. 1.3 продемонстровано залежності температурних режимів вогневих випробувань будівельних конструкцій, з огляду на пожежонебезпечні матеріали, що в них обертаються, та специфіку технологічних процесів у будівельних об'єктах. Якщо немає специфічних вимог для визначення температурного режиму, використовують формулу (1.1). На підставі таких припущень цю

функційну залежність [2] називають стандартною температурною кривою та вважають основою, що рекомендує вітчизняна й закордонна нормативна база.

Межу вогнестійкості залізобетонних плит і стін (для балок та колон ці параметри теплоізоляційної здатності не є необхідними) визначають за настанням одного з трьох граничних станів. Час, що відповідає чисельному значенню межі вогнестійкості, визначають за тим граничним станом, що настає першим.

Диференціюють кілька різновидів граничних станів вогнестійкості за такими ознаками:

- втрата несучої здатності (умовне буквене позначення R);
- втрата цілісності (умовне буквене позначення E);
- втрата теплоізоляційної здатності (умовне буквене позначення I).

Якщо проаналізувати несучі конструкції, то межу вогнестійкості колон і балок визначають лише за втратою несучої здатності конструкцій та вузлів (R). Для зовнішніх несучих стін і покриттів – втрата несучої здатності та цілісності (R, E). Для зовнішніх стін, що не несуть, – втрата цілісності (E). Для несучих внутрішніх стін і перегородок – втрата цілісності та теплоізоляційної здатності (E, I). Для несучих внутрішніх стін і протипожежних перешкод – усі три граничні стани (R, E, I) [2].

Відповідно до ознаки втрати несучої здатності, межа вогнестійкості залежить від типу та статичної схеми спирання конструкції. Однопрогонові вільно оперті згинальні елементи (балкові плити, панелі й настили перекриттів, балки, прогони) під час пожежі руйнуються, унаслідок нагрівання подовжньої нижньої робочої арматури до граничної критичної температури. На межу вогнестійкості таких конструкцій впливає товщина захисного шару нижньої робочої арматури, класу арматури, робочого навантаження й теплопровідності бетону. У балок і прогонів межа вогнестійкості залежить від ширини перерізу [64–66].

За одних і тих самих конструктивних параметрів межа вогнестійкості балок менша, ніж плит, оскільки в разі пожежі балки обігріваються з трьох боків (із боку нижньої та двох бічних граней), а плити – тільки з боку нижньої поверхні.

У низці випадків тонкостінні згинальні конструкції (пустотні й ребристі панелі та настили, ригелі й балки за ширини перерізу 160 мм і менше, що не мають вертикальних каркасів біля опор) під час пожежі можуть руйнуватися передчасно по косому перерізу біля опор. Такому характеру руйнування запобігають через встановлення на приопорних ділянках цих конструкцій вертикальних каркасів завдовжки не менше ніж $1/4$ прольоту [67–71].

Плити, оперті по контуру, мають межу вогнестійкості значно вищу, ніж прості елементи, що згинаються. Ці плити армовані робочою арматурою у двох напрямках, тому їхня вогнестійкість залежить додатково від співвідношення арматури в короткому й довгому прольотах. У квадратних плит, які мають співвідношення, що дорівнює одиниці, критична температура арматури в разі настання межі вогнестійкості становить $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ [72–80].



Рисунок 1.3 – Вигляд залізобетонної плити після пожежі

Зі збільшенням співвідношення сторін плити критична температура зменшується, отже, знижується й межа вогнестійкості. За співвідношення сторін понад 4, межа вогнестійкості практично дорівнює межі вогнестійкості плити, опертої з обох боків.

Статично невизначені балки й балкові плити внаслідок нагрівання втрачають несучу здатність через руйнування опорних і прогонових перерізів. Перетини в прольоті руйнуються, з огляду на те, що зменшується міцність

нижньої поздовжньої арматури. Зазнають руйнування й опорні перерізи, тому що бетон втрачає міцність у нижній стиснутій зоні, яка здатна нагріватися до високих температур. На швидкість прогріву зони впливають розміри поперечного перерізу, саме тому вогнестійкість статично невизначених балкових плит залежна від їхньої товщини, а балок – від ширини та висоти перерізу. У разі великих розмірів поперечного перерізу межа вогнестійкості конструкцій значно вища, ніж статично визначених конструкцій (однопрогонові вільно оперті балки та плити), фактично не залежить від товщини захисного шару в подовжній нижній арматурі (у низці випадків – у товстих балкових плит, у балок, що мають сильну верхню опорну арматуру) [81–85].

Балки. Збірні балки залізобетонні виготовляють лише на заводах, а монолітні – через заливання бетонного розчину в попередньо підготовлені арматурні конструкції, стрижні яких натягують із застосуванням домкратів. Ущільнення матеріалу відбувається за вібраційною технологією. Розчин у формі стає твердим приблизно за 12 годин, після чого продукцію переносять на відкрите повітря для закріплення властивостей [86].

У процесі виготовлення необхідно дотримуватися одного важливого параметра: бетонна суміш повинна розподілятися максимально рівномірно по всьому простору форми. Для створення цих виробів застосовують марку бетону 200 і вище. Готова балка залізобетонна має розрахункове навантаження понад 450 кілограмів / сили на один квадратний метр.



Рисунок 1.4 – Вигляд залізобетонної балки після нагрівання під час пожежі.

Колони. Межа вогнестійкості колон залежить від схеми застосування навантаження (центральне, позацентрове), розмірів поперечного перерізу, відсотка армування, виду великого заповнювача бетону та товщини захисного шару біля поздовжньої арматури.

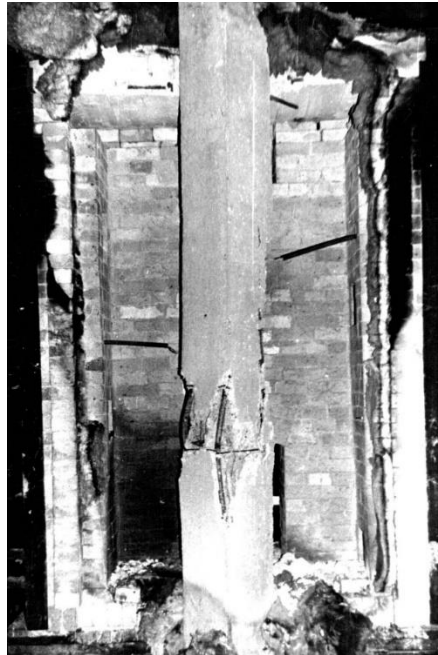


Рисунок 1.5 – Вигляд залізобетонної колони за тривалого впливу температури пожежі.

Руйнування колон під час нагрівання відбувається внаслідок зниження міцності арматури й бетону. Нецентрована програма навантаження зменшує вогнестійкість колон. Якщо навантаження докладене з великим ексцентриситетом, то вогнестійкість колони залежатиме від товщини захисного шару розтягнутої арматури. Отже, характер роботи таких колон у разі нагрівання такий самий, як і простих балок. Вогнестійкість колони з малим ексцентриситетом наближається до вогнестійкості центрально-стислих колон. Меншу вогнестійкість, ніж колони на вапняному щебені, мають колони з бетону на гранітному щебені (на 20 %). Граніт починає руйнуватися за температури 573°C , а вапняки – за температури початку їх випалу 800°C .

Стіни. Зазвичай, під час пожеж стіни обігріваються з одного боку, тому прогинаються чи в бік вогню, чи у зворотному напрямку. Стіна з центрально-

стиснутої конструкції перетворюється на позацентрово стиснуту з ексцентриситетом, що збільшується в часі. У цих умовах вогнестійкість несучих стін суттєвою мірою залежить від навантаження та від їхньої товщини. Зі збільшенням навантаження і зменшенням товщини стіни її межа вогнестійкості зменшується та навпаки [87].



Рисунок 1.6 – Обрушення частини стіни під час пожежі

Зі збільшенням поверховості будівель навантаження на стіни зростає, тому для необхідної вогнестійкості товщину несучих поперечних стін у житлових будинках затверджують рівною (мм): у 5... 9-поверхових будинках – 120, 12-поверхових – 140, 16-поверхових – 160, у будинках висотою понад 16 поверхів – 180 і більше.

Одношарові, двошарові та тришарові самонесучі панелі зовнішніх стін зазнають впливу невеликих навантажень, через це вогнестійкість стін у відповідності з протипожежними вимогами.

Несучу здатність стін у разі високої температури визначають не тільки за зміною характеристик міцності бетону й сталі, а й за деформативністю елемента в цілому. Вогнестійкість стін аналізують, зазвичай, залежно від втрати несучої здатності (руйнування) у нагрітому стані. Ознака обігріву «холодної» поверхні стіни на 140°C не є характерною. Межа вогнестійкості залежить від робочого

навантаження (запасу міцності конструкції). Руйнування стін від одностороннього впливу відбувається за однією з трьох схем:

1) із незворотним розвитком прогину вбік поверхні, що обігривається. Руйнування стіни відбувається у серединній частині висоти у випадку позацентрового стиску (по нагрітій арматурі або по «холодному» бетону);

2) із прогином елемента на початку вбік нагрівання, а на кінцевій стадії в протилежному напрямку; руйнування – усередині висоти по нагрітому бетону або по «холодній» (розтягнутій) арматурі;

3) зі змінної напрямку прогину, як і в схемі 1, але руйнування стіни відбувається в приопорних зонах по бетону холодної поверхні або по косих перерізах.

Перша схема руйнування характерна для гнучких стін, друга і третя – для стін із меншою гнучкістю та платформно опертих стін. Якщо обмежити свободу повороту опорних перерізів стіни, як за платформного спирання, зменшується її деформативність, тому межа вогнестійкості збільшується. Так, платформне опирання стін (на площині, що не зміщується) у середньому збільшувало межу вогнестійкості вдвічі, порівняно з шарнірним опиранням, незалежно від схеми руйнування елемента.

Зменшення відсотка армування стінок за шарнірного опирання знижує межу вогнестійкості; за платформного ж опирання зміна в нормальних межах армування стін на їхню вогнестійкість впливає несуттєво. У разі одночасного нагрівання стіни з двох боків (міжкімнатні стіни) не з'являється температурного прогину. Конструкція і надалі працюватиме на центральне стискування, тому межа вогнестійкості не нижча, ніж у разі одностороннього обігріву.

Відповідно до [2], втрата теплоізоляційної здатності настає в разі появи таких ознак: температура на необігрівній поверхні стіни протягом контрольного часу для плит досягає значення 140 °С або в певній будь-якій точці температура дорівнює значенню 180 °С.

Ознакою цього стану [2] є випинання та оголення робочої арматури, досягнення критичних значень прогину та швидкості його наростання, повна або

часткова деструкція шару бетону. Згідно з вимогами [1–2], критичні значення прогину та швидкості наростання визначають у мм та мм·хв⁻¹ за формулами:

$$D = \frac{L^2}{400h}, \quad \frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000h} \quad (1.7),$$

де L – довжина плити, h – висота перерізу плити, мм.

Граничний стан за ознакою втрати цілісності визначають для огорожувальних конструкцій. Наприклад, для колон і балок оцінюють лише несучу здатність, яка і визначає їхню межу вогнестійкості. Відповідно до [1; 2], втратою цілісності вважають:

– загоряння або тління зі свіченням ватного тампона, що піднесений до необігрівальної поверхні зразка в місця тріщин на відстань від 20 до 30 мм протягом часу від 10 до 30 с;

– поява тріщини, через яку в піч можна ввести без додаткових зусиль щуп діаметром 6 мм та перемістити його вздовж цієї тріщини на відстань не менше як 150 мм;

– виникнення тріщини (або отвору), через яку в піч можна вільно ввести щуп діаметром 25 мм;

– полум'я на необігрівальній поверхні зразка простежуване протягом щонайменше 10 с.

Отже, уразі пожежі необхідно брати до уваги спільну роботу елементів та роботу кожного елемента. Будь-яке порушення цілісності одного з видів конструкцій призводить до зниження міцності іншого та можливого обрушення частини будівлі. У нормативних документах окреслено вимоги до необхідного часу евакуації людей та роботи підрозділів ОРС ЦЗ. На підставі цих вимог визначають необхідну межу вогнестійкості. Як зазначено в розділі 1.1, ця межа має бути перевірена одним із регламентованих методів.

1.2. Аналіз методів прогнозування вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій

Існує кілька методів прогнозування вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій [22–23; 36–37]. Можливо виокремити експериментальні методи: натурні досліди й оцінювання вогнестійкості в спеціальних печах; експериментально-розрахункові методи, що постійно вдосконалюють, оскільки вони допомагають зважати на особливості виготовлення конструкцій, унаочнити поведінку під час пожежі; розрахункові методи, які можуть бути як достатньо простими, так і надзвичайно високої складності, що позначається на ціні.

Названі методи підлягають певній ієрархії. На думку більшості науковців [22–23; 36–37; 88–91], методи варто вибудовувати в такій послідовності: експериментальні методи; експериментально-розрахункові методи; розрахункові методи. Кожен із цих методів також має свою ієрархію, що зумовлює наявність їхніх переваг і недоліків, які виявляються під час оцінювання вогнестійкості.

1.2.1. Експериментальний підхід до прогнозування вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій. За експериментальних підходів можливі два сценарії визначення вогнестійкості: фактичне визначення та перевірка необхідної межі вогнестійкості [2; 92]. У разі першого варіанта можливе використання натурних дослідів і випробування в спеціальних печах. Варто зазначити, що натурні експерименти є надзвичайно вартісними, порівняно з іншими методами оцінювання вогнестійкості, тому їх проводять у виняткових випадках. Дослідно-випробувальні лабораторії намагаються уникати обрушення навантажених несучих конструкцій, оскільки це призведе до пошкодження випробувальної установки.

Завершальна мета прогнозування вогнестійкості – визначення надійності конструкцій у разі пожежі, що забезпечує необхідний час для евакуації, рятувальних робіт і ліквідації пожежі. З огляду на це, натурні досліди мають перевагу над випробуваннями вогнестійкості у вогневих випробувальних печах.

Застосовуюючи метод натурних вогневих випробувань, визначають часовий проміжок – від миті запалювання модельного вогнища пожежі, що розташоване в одному з приміщень будівельного об'єкта, до настання нормованих для будівельних конструкцій граничних станів із вогнестійкості в регламентованих умовах [2; 92].

Один із натурних експериментів провели львівські дослідники [93]. Одна стійка та частина балки були захищені одним шаром вогнестійкого гіпсокартону завтовшки 12 мм, для вогнезахисту іншої частини застосували два шари гіпсокартону завтовшки 12 мм. Гіпсокартон був прикріплений до балки за допомогою самонарізів; щілини поміж листами – зароблені гіпсовою штукатуркою. Середня частина балки – не захищена. У цій частині виконано температурні заміри в перерізі елемента. У приміщенні й у перерізі елементів конструкції температуру визначали за допомогою термопар, що були встановлені за схемою методики.

Конструкція рами виготовлена з дерев'яних брусів. Передбачено частковий захист її елементів за допомогою вогнетривкого гіпсокартону. Дерев'яна рама виготовлена з клеєного дерев'яного бруса перерізом 16×18 см, складалася з балки прольотом 2,6 м і двох стійок заввишки 2,5 м. Матеріал бруса – деревина з соснових брусків із поперечним перерізом 3×5 см, густиною 510 кг/м та вологістю 15 %. Приклад складання деревини продемонстровано на рис. 1.7.



Рисунок 1.7 – Зовнішній вигляд брусків із поперечним перерізом 3×5 см, що підготовлені до випробувань

Покази термопар зареєстровано з використанням приладів ПКРТ-0103. Пожежне навантаження створено за допомогою штабелів розміром $0,9 \times 0,9 \times 0,9$ м, складених із дерев'яних дошок. Дошки були розміщені шарами, перпендикулярно один до одного, із розривами 5–10 см. Величина пожежного навантаження дорівнювала 70 кг/м^2 . У зв'язку зі складністю зовнішнього навантаження та безпечними умовами експерименту, дерев'яну раму не завантажили. Конструкція рами підготовлена до випробувань у приміщенні з пожежним навантаженням.

Натурні випробування мають очевидні переваги, що виявляються в наочності, точному відтворенні реальних процесів. Водночас такі випробування мають певні недоліки:

- можливість узяти до уваги лише пожежне навантаження, однак оминати особливості матеріалів і швидкість поширення полум'я;
- необов'язковий збіг розміру макета з майбутнім об'єктом, попри його реальність; після будівництва можлива зміна навантаження на конструкції, унаслідок, наприклад, підвищеної поверховості будівлі;
- трудомісткість і висока вартість;
- неможливість передбачити зміни, що стануться на етапі будівництва.

Метод випробувань на вогнестійкість за стандартним температурним режимом застосовують, залучаючи вогневі випробувальні установки, що поєднують вогневу піч і навантажувальний пристрій, із прямою фіксацією межі вогнестійкості за настанням граничного стану. До вогневих печей окреслено низку особливих вимог:

- нагрівальний факел, створений на рідкому паливі;
- полум'я факела не повинно торкатися поверхонь елементів конструкцій, що нагріваються;
- рівномірно розподілена температура по об'єму нагрівальної камери;
- протягом випробування в об'ємі нагрівальної камери температура змінюється за температурним режимом пожежі, що регламентоване в стандарті [2].

Вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій випробовують відповідно до стандартів [1–2; 92], що регламентують такі положення:

– для внутрішніх і зовнішніх стін метою є оцінювання здатності репрезентативного зразка несучої стіни протидіяти поширенню пожежі з одного боку на інший та зберігати несучу здатність; навантаження на зразок може бути прикладене за допомогою навантажувальних домкратів, розташованих зверху або знизу рами; якщо навантаження прикладене за допомогою жорсткої балки, то вона повинна мати достатню жорсткість для рівномірного вертикального відхилення вздовж зразка; якщо навантаження прикладене окремо до стояків на стіні, то навантажувальна система має підтримувати постійне навантаження в кожній точці навантажування [92];

– метод випробування перекриття (покриття) допомагає визначити часовий проміжок від моменту початку випробування за температурним режимом, за умови вогневого впливу на зразок знизу, до настання одного з нормованих для граничних станів із вогнестійкості (умови: плита має зазнавати теплової дії разом із прикладенням механічного навантаження, що повинно бути рівним до навантаження на цю плиту, згідно з конструкторською документацією; прикладання навантаження відбувається, зазвичай, завдяки встановленню на них бетонних блоків, що відіграють роль тягарів) [92–93];

– під час дослідів за стандартним температурним режимом у спеціальних печах зразки колон потрібно випробовувати під навантаженням; можливі випробування вогнестійкості без навантаження зразків металевих колон із вогнезахисним покриттям й облицюванням [2], а також без навантаження – зразки залізобетонних колон, для яких неможливо в ході випробувань у лабораторії відтворити умови навантаження, передбачені в розрахунковій схемі, через технічні причини;

– для визначення вогнестійкості балок у спеціальних печах також застосовують метод випробування, що сприяє визначенню часу від моменту початку випробування до настання нормованого граничного стану з вогнестійкості; конструкція печі повинна вможлилювати нагрівання зразка з

трьох боків; необхідно, щоб обладнання для спирання та кріплення зразка [94–95] у печі створювало умови для вільного спирання зразка та / або умови закріплення кінців зразка, згідно з проєктною документацією балки.

На рис. 1.8 на прикладі горизонтальних елементів продемонстровано схему подібних випробувань. Теплова дія стає можливою внаслідок спалення рідкого пального – газу або мазуту у форсунках. За імплементованими нормативними документами [96–98], передбачене використання газових пальників. За відсутності особливих вимог температурний режим має відповідати стандартному температурному режимові пожежі. В окремих випадках температурний режим може змінюватися відповідно до призначення будівлі. У ході роботи змодельовано споруди різного призначення. Зокрема, досліджено [93] температурний режим у разі змінних параметрів пожежного навантаження, швидкості повітряних потоків і параметрів закритого об'єму, у якому відбувається пожежа.

На рис. 1.8 представлено загальну схему випробувань вогнестійкості горизонтальних несучих конструкцій.

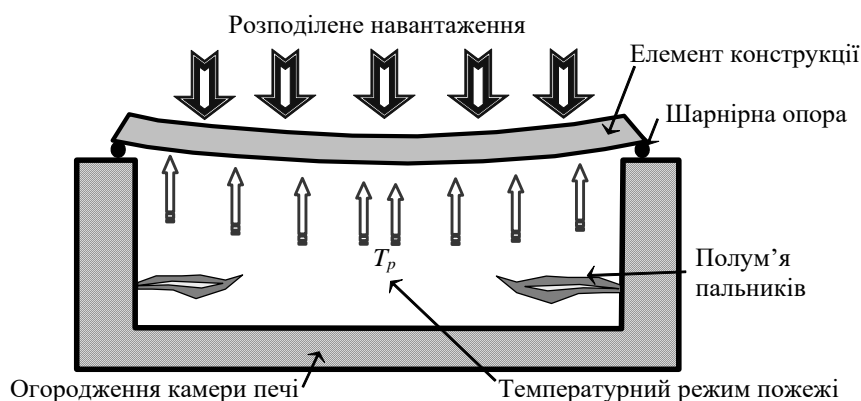


Рисунок 1.8 – Приклад схеми проведення випробувань вогнестійкості горизонтальних залізобетонних будівельних конструкцій

Установка для випробувань складається з вогневої печі, що є її основою. Огородження печі має витримувати навантаження з боку випробовуваного елемента й тягарів, які встановлені на нього. Також установка повинна бути

оснащена паливно-форсунковою системою, контрольно-вимірною системою, програмним забезпеченням для впорядкування й оброблення вимірювань.

У ході випробувань має відбуватися нагрівання зразка у вогневій камері печі за допомогою пальників, які повинні бути розташовані так, щоб полум'я не торкалося поверхні зразка. У пальниках варто використовувати рідке паливо, яке подають автоматично. Більш чіткі вимоги до паливно-форсункової системи в нормативному документі [2] відсутні, не регламентована, зокрема, висота печей, розташування пальників та отворів для видалення продуктів горіння з камери печі.

На рис. 1.9 запропоновано приклади наявних випробувальних установок у нашій державі та за кордоном.



Рисунок 1.9 – Зображення установок для випробувань залізобетонних конструкцій на вогнестійкість

У конструкції печі, згідно з вимогами [2], передбачено засоби вимірної техніки, потрібні під час випробувань за стандартним температурним режимом, до них належать:

- системи для вимірювання температури в печі, а також на (в) зразку;
- пристрої для вимірювання надлишкового тиску в печі;
- прилади для вимірювання навантаження на зразок;
- пристрої для вимірювання деформацій зразка;
- прилади для оцінювання цілісності зразка.

Відомості, представлені в табл. 1.4, засвідчують, що для контролю температури у вогневій камері печі можна застосовувати термопари з неізолюваними проводами або термопари, що покриті захисним кожухом, який повинен бути видалений (відрізаний і знятий) на довжині не менше як 25 мм від вимірювального спаю термопари. Вимірювальний спай термопари має бути зварним [2].

Таблиця 1.4

Засоби вимірювальної техніки, що використовують
під час випробувань [2]

Засоби вимірювальної техніки	Вимоги відповідно до [2]	Точність	Примітка
У процесі вимірювання температури в печі	Потрібно застосовувати термопари з діаметром дроту не більше ніж 1,5 мм типу ТХА або термопари інших типів за [15], що придатні для вимірювання температури в діапазоні від 0 до 1300°C.	±15 °C	Термопари типу ТХА мають характеристики, найбільш близькі до прямої. Призначені для роботи в окисних та інертних середовищах [57; 99].
У ході вимірювання температури необігрівальної поверхні зразка	Потрібно застосовувати термопари з дроту діаметром від 0,5 до 0,75 мм типу ТХК або інші за [15], що придатні для вимірювання температури в діапазоні від 0 до 300°C.	±4 °C	Термопари типу ТХК мають найбільшу чутливість, високу термоелектричну стабільність за умов температури до 600°C. Призначені для роботи в окисних та інертних середовищах. Недолік – висока чутливість до деформацій [57; 99].

Продовження таблиці 1.4

Під час вимірювання температури всередині зразка	Потрібно застосовувати термопари з діаметром дроту не більше ніж 0,75 мм типу ТХА або термопари інших типів за [15], що придатні для вимірювання температури в діапазоні від 0 до 600°C.	± 10 °C	Термопари типу ТХА мають найбільш близькі до прямої характеристики. Призначені для роботи в окисних та інертних середовищах [57; 99].
У процесі вимірювання температури навколишнього середовища	Необхідно вимірювати термопарою, конструкція якої аналогічна до конструкції термопар, призначених для вимірювання температури в печі.	± 4 °C	Можливе застосування інших засобів, що дають змогу виміряти температуру довкілля, якщо вони гарантують точність вимірювання [2].
Для вимірювання температури довкілля	Необхідне вимірювання термопарою, конструкція якої аналогічна до конструкції термопар, призначених для вимірювання температури в печі.	± 4 °C	Можливе застосування інших засобів, що дають змогу виміряти температуру довкілля, якщо вони забезпечують точність вимірювання [2].
Надлишковий тиск у печі	Необхідно вимірювати приладами, що вможливають вимірювання з точністю.	± 2 Па	
Вимірювання навантаження	Може бути виконане за допомогою динамометру або інших приладів, які забезпечують вимірювання з точністю.	± 5 %	
Вимірювання деформацій	Може бути виконане механічними, оптичними або електричними приладами, які мають забезпечувати вимірювання деформацій із необхідною точністю.	± 2 мм	

У чинних стандартах регламентовано: якщо конструкція печі дає змогу це зробити, то можливе одночасне випробування більше ніж одного зразка залізобетонних конструкцій.

Вимоги [96–98] передбачають, що термометри в печі мають являти собою пластинчасті термометри – збірки, до складу яких входять вигнута пластина, виготовлена зі сплаву нікелю, термопара, прикріплена до неї, теплоізоляційний матеріал.

Вигнута металева пластина має бути виготовлена зі смужки спеціального аустенітного сплаву на основі нікелю, стійкого до окислення за високої температури, довжиною (150 ± 1) мм, шириною (100 ± 1) мм і товщиною $(0,7 \pm 0,1)$ мм, вона повинна бути зігнута з таким розрахунком, щоб забезпечити будову, продемонстровану на рис. 1.10 [96]. Між мідним диском і поверхнею зразка для випробування, а також між мідним диском і теплоізоляційною накладкою не повинно бути в'язучої речовини.

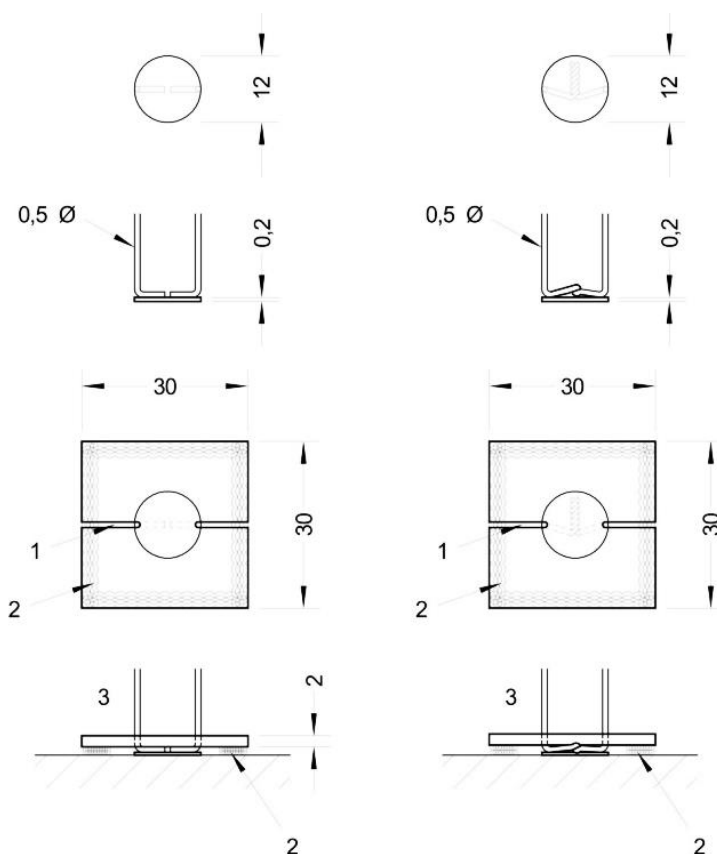


Рисунок 1.10 – Будова пластинчастого термометра (розміри зазначено в міліметрах)

Вимірювальний спай має складатися з дротів термопар типу «хромель – алюмель» (типу К), згідно з [97], що розташовані в мінеральній ізоляції всередині оболонки, виготовленої із жаростійкого сталевого сплаву, номінальним діаметром у межах від 1 мм до 3 мм. Гарячі спаї повинні бути електрично ізолювані від оболонки. Гарячий спай термопар має бути закріплений у геометричному центрі пластини в точці, зображеній на рис 1.10, за допомогою смужки невеликого розміру, виготовленої з того самого матеріалу, що й пластина. Смужку можна приварювати до пластини, також прикріплювати до пластини гвинтами для полегшення заміни термопар. Розміри смужки мають бути приблизно 18 мм × 6 мм у разі її точкового приварювання до пластини. У випадку її прикріплення до пластини гвинтами номінальні розміри дорівнюють 25 мм × 6 мм. Діаметр гвинта має бути 2 мм.

Збірку, що складається з пластини й термопар, потрібно оснащувати накладкою, виготовленою з неорганічного ізоляційного матеріалу, із номінальними розмірами (97 ± 1) мм × (97 ± 1) мм і товщиною (10 ± 1) мм, густина якого дорівнює (280 ± 30) кг/м³.

Перед першим використанням пластинчастих термометрів складчасту частину потрібно піддати старінню через розміщення в печі, нагрітій до 1000 °С, на 1 год. Можливо, щоб ця частина зазнала теплового впливу в печі для випробувань на вогнестійкість протягом 90 хв., під час випробування за стандартним температурним режимом.

У разі використання багаторазового пластинчастого термометра потрібно вести записи, зазначаючи для кожного випадку перевірки та тривалість користування. Термопару й теплоізоляційну накладку необхідно замінювати через кожні 50 год. теплового впливу в печі.

Переваги цього методу вмотивовані тим, що можливо брати до уваги умови, за яких виготовляли окремі елементи будівельних конструкцій, а також особливості матеріалів, із яких створено бетон, оскільки в разі експериментальних методів використовують реальні будівельні конструкції. Варто назвати такі недоліки:

- під час випробування будівельних конструкцій усіх типів замовник може змінювати навантаження;
- у ході випробувань колон можуть з'являтися похибки, спричинені тим, що замовник випробовуватиме зразки без навантаження взагалі, не братиме до уваги це під час оформлення протоколів; якщо навантаження використовують, то воно є лише гравітаційним та оминає крутні моменти, створені боковими навантаженнями на колону;
- у разі випробування плит до істотної похибки можуть призводити обмежені вимоги до розташування та способу прикладення навантажень;
- допустиме випробування фрагментів конструкцій (наприклад, стін), тому з'являється невідповідність граничних умов навантаження й кріплення зразка граничним умовам реального елемента, що буде застосовано на об'єкті будівництва;
- метод випробувань у спеціальних установках, як і натурні експерименти, є трудомістким, вартісним та екологічно небезпечним.

Отже, доцільно вдосконалити описані методи. Похибки, що виникають під час експериментів, варто брати до уваги в процесі додаткових розрахунків.

1.2.2. Розрахунковий підхід до прогнозування вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій. Розрахункові методи мають різну обчислювальну базу, умовно їх можна розподілити на спрощені методи й уточнені методи.

Спрощені методи – методи, які використовують напівемпіричний підхід, а також спрощений інженерний підхід, що має в основі комплекс гіпотез, чітко теоретично не обґрунтовані. Це дає змогу використовувати нескладні алгебраїчні формули й рівняння. На рис. 1.8 подано структуру спрощених розрахункових методів оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій в умовах пожежі зі стандартною температурною кривою.

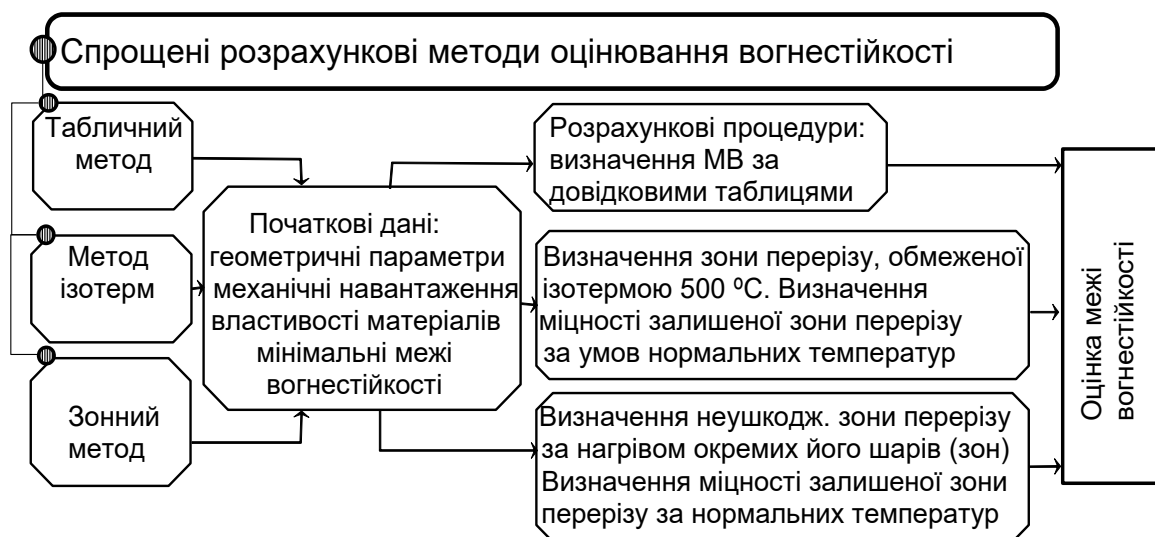


Рисунок 1.11 – Структурна схема спрощених розрахункових методів оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій в умовах пожежі зі стандартним температурним режимом

Спрощені методи засновані на використанні спеціальних таблиць, де зазначено мінімальні розміри товщини плит і захисного шару. Такі методи не потребують складних розрахунків, методика їх застосування стали нормою в багатьох державах [57].

Табличні методи мають суттєвий недолік, що полягає у невисокій точності результатів (похибка близько 30-40 %) [100–103]. Ця похибка аргументована тим, що дані таблиці узагальнюють великий емпіричний досвід із великим спектром геометричних параметрів плит, навантаження та умов закріплення. Табличний метод застосовують тільки тоді, коли необхідно швидко оцінити клас вогнестійкості, оминаючи увагою суттєвий запас міцності, що можна отримати.

Усі інші розрахункові методи зазвичай розподіляють за двома автономними задачами – теплотехнічною і міцнісною (статичною) [104–106]. Теплотехнічну задачу вирішують із використанням розрахунків, даних експериментів або теоретичних методів. Статичну задачу вирішують за допомогою застосування різних моделей напружено-деформованого стану бетону та арматурної сталі.

Уточнені методи засновані на базових рівняннях теплопровідності та напружено-деформованого стану в часткових похідних і їх реалізації одним із

обчислювальних методів, з врахуванням температурних деформацій та деформації текучості / «повзучості» у сталевих елементах та шарі бетону.

Для вирішення теплотехнічної задачі необхідно застосувати одну з математичних моделей нестационарної теплопровідності. Розв'язання задачі нестационарної теплопровідності полягає в знаходженні залежності температури й кількості переданої теплоти в часі для будь-якої точки простору. Така залежність може бути отримана через розв'язання диференціального рівняння теплопровідності.

За відсутності внутрішніх джерел тепла для тіл найпростішої форми (необмежена пластина, необмежений циліндр, куля) диференціальне рівняння теплопровідності для одновимірного температурного поля має вигляд:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{m}{x} \frac{\partial t}{\partial x} \quad (1.8)$$

Множник «а» у рівнянні називають коефіцієнтом температуропровідності. Ця величина дорівнює:

$$a \equiv \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \quad (1.9),$$

де ρ – густина, кг/м³, c_p – питома масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг К), λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу нерухомого середовища, Вт/(м К).

Варто зазначити, що коефіцієнт температуропровідності залежить також від вологості матеріалу. У вологих матеріалів цей коефіцієнт, зазвичай, менший, бо в разі нагрівання вологих матеріалів частина енергії іде на нагрів і випаровування води, що зменшує швидкість змін температури.

Рівняння (1.8) являє собою рівняння другого порядку в часткових похідних. Для його розв'язання необхідно провести операції інтегрування функції один раз за часом і два рази по координаті. Отриманий унаслідок інтегрування розв'язок буде мати три константи інтегрування. Отже, для розв'язання диференціального

рівняння теплопровідності необхідно мати одну початкову та дві граничні умови, а також знати геометричні розміри й фізичні властивості тіла.

Умови однозначності задано у вигляді:

- фізичні параметри (коефіцієнт теплопровідності, густина, теплоємність);
- форми й геометричні розміри об'єкта;
- початкові умови (час, температура);
- граничні умови (першого, другого або третього роду).

За граничних умов першого роду задано температуру поверхні тіла як функцію часу:

$$t_c(\tau) = f(\tau) \quad (1.10)$$

t_c – температура середовища (тіла, що нагрівається, $t_c > t_0$).

У разі граничних умов другого роду задано густину теплового потоку на поверхні тіла як функцію часу:

$$q_c(\tau) = f(\tau) \quad (1.11)$$

Граничні умови третього роду характеризують закон конвективного теплообміну між поверхнею тіла й навколишнім середовищем. Це описують за допомогою рівняння Ньютона – Ріхмана:

$$q = \alpha(t_c(\tau) - t_{\text{ж}}) \quad (1.12),$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі від середовища до тіла або навпаки.

Граничні умови третього роду є найбільш загальними умовами, тому що вони за певних умов можуть переходити в граничні умови першого або другого роду.

Диференціальне рівняння теплопровідності (1.9) спільно з умовами однозначності (1.10) дає остаточне математичне формулювання цієї задачі. Розв'язання полягає в пошуку функції:

$$t = f(x, y, z, \tau, \alpha, a, t_0, t_{\text{ж}}, l_0, l_1, \dots, l_n), \quad (1.13)$$

t_0 – початкова температура тіла.

Поверхня тіла відразу ж розпочинає теплообмін із середовищем, тому температура тіла на поверхні з моменту розміщення його в середовище відразу починає збільшуватися, після певного часу досягає температури середовища. Температура точки в центрі тіла деякий час залишається незмінною, дорівнюючи її початковому значенню (t_0), поки відбувається процес прогріву. Швидкість прогрівання за нестационарних умов залежить від зміни теплотехнічних характеристик. У процесі нагрівання необхідно зважати на те, що теплоємність, теплопровідність і густина залізобетону змінюються. Це важливо для більш точного розрахунку або для експериментів, що передбачають використання експериментально-розрахункового методу.

Коефіцієнт теплопровідності – фізична характеристика речовини, що дорівнює кількості теплоти, яка передається за одиницю часу ізотермічній поверхні за умови, що градієнт температури рівний одиниці (одному градусу на одиницю довжини по нормалі до ізотермічної поверхні).

Коефіцієнт теплопровідності твердих тіл є функцією температури, а для рідин і газів залежить також від тиску:

$$\lambda_{\text{тв}} = f(\tau), \quad \lambda_{\text{р}} = f(\tau; p) \quad (1.14)$$

У разі поширення тепла температура в різних частинах тіла різна, тому необхідно знати залежність коефіцієнта теплопровідності від температури:

$$\lambda = \lambda_0(1 + b(T - T_0)) \quad (1.15),$$

де λ_0 – значення коефіцієнта теплопровідності за $T_0 = 273.15$ К, Вт/(м·К), T – абсолютна температура, К, b – константа, що визначають експериментальним способом, K^{-1} .

На противагу рідинам і газам, у твердому стані теплопередача не супроводжувана перенесенням маси (конвекцією). Основний характер руху – коливальний. За взаємодії між атомами коливання передаються від атома до атома, у такий спосіб виникає хвиля, що переміщує енергію коливання зі швидкістю звуку. Для спрощення математизації процесу варто розглядати переміщення теплоти фіктивними частинками, які називають фононами. Для твердих тіл характерні вільні носії заряду (електрони), тому доцільно зважати на електронний складник теплопровідності.

Аналогічні ситуації стосуються коефіцієнта теплоємності й густини. У сучасних нормативних документах (Єврокодах) [35] подано графіки та аналітичні вирази для визначення цих величин. Водночас варто зважати на специфіку багатокомпонентних матеріалів. З'являється погрішність у разі використання лише розрахункового підходу. Цього можливо уникнути, якщо нагріти елементи матеріалу (конструкції) до проведення розрахунку.

Після визначення температурних розподілів під час нагрівання за вибраним режимом настає етап розрахунку міцності матеріалу. На цьому етапі можливо врахувати навантаження на конструкцію ззовні та внутрішні напруження під час нагрівання.

Розрахункові методи дають змогу аналізувати пластичні властивості матеріалів і задавати початкове значення напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій. Це є перевагою, оскільки за допомогою обчислювальних алгоритмів допомагає оцінити межу вогнестійкості й автоматизувати такий розрахунок.

Спрощені методи мають високу продуктивність і не вимагають особливої підготовки до розрахункових процедур. Уточнені методи є більш складними, але за достатньої кваліфікації спеціаліста й потужності комп'ютерної техніки можуть забезпечити високу точність і порівняно низьку вартість кінцевого результату. Водночас варто назвати певні недоліки:

- методи оминають увагою ключові особливості складових частин залізобетону, а саме структурний, фазовий і хімічний склад бетону, що зумовлюють особливості його поведінки в умовах комбінованої дії механічного навантаження та нагрівання від вогневої дії пожежі;
- складно передбачити особливості крупного заповнювача, оскільки його добувають у різних місцях, навіть за різних приблизно рівних він може розширюватися неоднаково, що неможливо знати без реального експерименту;
- мілкий заповнювач у різних регіонах має різну структуру, зокрема, можливе використання морського або річкового піску, що впливає на міцність конструкції та поведінку під час нагрівання;
- без експериментальних (вогневих) випробувань неможливо з'ясувати, як поведуться добавки до бетону внаслідок нагрівання (наприклад, пластифікатори можуть створювати їдкий дим, а морозостійкі добавки сприяти появі тріщин тощо).

1.2.3. Експериментально-розрахунковий підхід до прогнозування вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій. Експериментально-розрахункові підходи до визначення вогнестійкості будівельних конструкцій поєднують випробування з розрахунками, на основі яких із достатньо високою точністю оцінюють вогнестійкість конструкцій. Ці підходи базовані як на нормативних документах щодо експериментальних методів, так і на вимогах до розрахунків. Зазвичай, спочатку проводять реальний експеримент, а його дані є вхідними для проведення розрахунку.

Більшість експериментально-розрахункових методів [64; 80; 107; 108] пов'язана з проведенням експериментів, спрямованих на знаходження температурних розподілів у шарах (зонах) зразків, що моделюють шари елементів залізобетонних конструкцій для визначення на їхній основі теплофізичних характеристик. У цьому математична модель теплопередачі побудована на нелінійному нестационарному рівнянні Фур'є, тому теплофізичні характеристики визначають за допомогою вирішення зворотних задач теплопровідності.

Методи, засновані на вирішенні оберненої задачі теплопровідності [64; 80], дещо однобічно враховують феноменологію процесу нагрівання, аналізуючи лише її теплофізичний аспект. Інші важливі феноменологічні дані про механічні властивості бетону не визначають, а використовують відомості з попередніх досліджень, наприклад [109].

Розрахунково-експериментальні методики [107] доцільні для оцінювання вогнестійкості на основі моделювання прогріву та навантаження під час пожежі внутрішніх шарів залізобетонних будівельних конструкцій спеціальними бетонними зразками. Згідно з цими методиками, передбачено фізичний поділ перерізу елемента конструкції в модельованій зразками ділянці, що підлягають комбінованим випробуванням в умовах, близьких до тих, у яких перебуває внутрішній шар реального елемента залізобетонної конструкції в ході нагрівання за стандартним температурним режимом пожежі. Умови проведення випробувань визначають розрахунковим способом, зважаючи на комп'ютерне моделювання процесів у внутрішніх шарах.

У дослідженні [107] обґрунтовано експериментальні й розрахункові методики, пов'язані з комбінованими лабораторними випробуваннями бетонних зразків. Для реалізації розрахунково-експериментального методу визначення несучої здатності позацентрово стиснутих залізобетонних колон під час пожежі створено схему, що представлена на рис. 1.12. На схемі зображено поділ колони, відповідно до чого прикладені розподілені навантаження.

1	5	9	13	17	21	25	29
2	6	10	14	18	22	26	30
3	7	11	15	19	23	27	31
4	8	12	16	20	24	28	32

Рисунок 1.12 – Схема поділу перерізу позацентрово стиснутої залізобетонної колони на кінцеві ділянки в разі її всебічного нагрівання

У працях [107; 110] докладно описано методики застосування розрахунково-експериментального методу для центрально стислих колон. Для позацентрово стиснутої колони розглянуто залізобетонну колону перерізом 400×400 мм, довжиною 3 м, що виготовлена з важкого бетону В30 на гранітному заповнювачі з чотирма поздовжніми стержнями, які армують, класу А-III і захисним шаром покриття 40 мм. Згідно з розрахунковою схемою, на колону діє навантаження 2,5 МН із випадковим ексцентриситетом, рівним 0,01 м.

Для випробувань розраховано теплові режими, що описані в роботі [107]. Кожен зі зразків був навантажений силою, розрахованою з огляду на момент, що зумовлений наявністю випадкового ексцентриситету. Навантаження подано в табл. 1.5 за схемою дискретизації перерізу, що представлено на рис. 1.12.

Таблиця 1.5

Значення навантажень, прикладених до зразків, що моделюють шари позацентрово стиснутої залізобетонної колони

	N, кН							
	1-4	5-8	9-12	13-16	17-20	21-24	25-28	29-32
Ø56 мм	33.43	34.88	36.32	37.76	39.21	40.65	42.09	43.54
Ø76 мм	61.58	64.24	66.9	69.55	72.21	74.87	77.53	80.19

Комбіновані випробування проведено на установці керованої муфельної печі та гідравлічного домкрата, згідно з методикою, описаною в роботі [107]. Температурні режими нагрівання зразків регульовані за допомогою керованого пристрою ПРОТЕРМ 100.

Експеримент проходив за фіксованого положення губок основи установки й гідравлічного домкрата. Основний показник, визначений під час експерименту: тиск у робочому циліндрі домкрата, що відповідає середній напрузі стиснення у випробуваному зразку. Типові результати вимірів зображено на рис. 1.13.

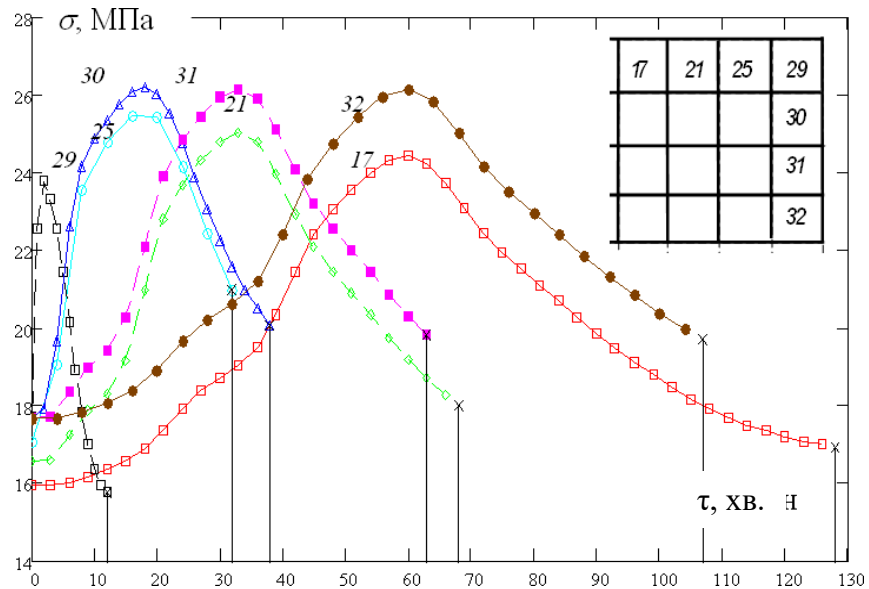


Рисунок 1.13 – Залежності напруги від часу для бетонних зразків 76 із В/Ц = 0,36 та крупністю заповнювача 30–40 мм, що моделюють внутрішні шари позацентровано стиснутої залізобетонної колони

На рис. 1.14 представлено узагальнені результати випробувань порівняно з напругами, спричиненими нормативним навантаженням.

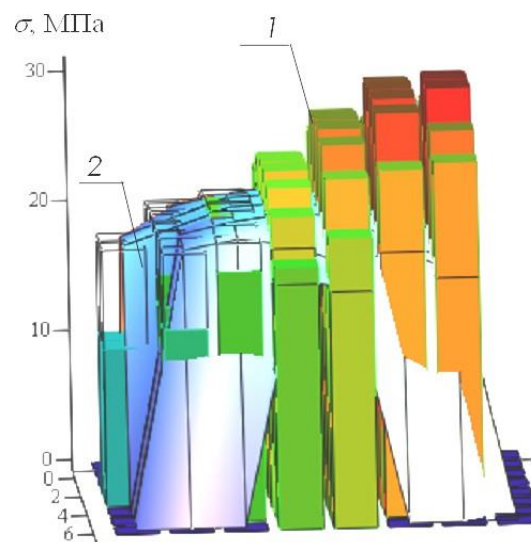


Рисунок 1.14 – Напруги (1) для позацентровано стиснутої колони та міцність (2) зразків після комбінованих випробувань

Зовнішнє штатне навантаження, відповідно до розрахункової схеми будівлі, створює деформацію, що визначають за рівняннями [107]:

$$\sum_i \sum_j E_{btij} f\left(\varepsilon + \frac{y_{ij}}{\rho}\right) + \sum_i \sum_j E_{btij} f_a\left(\varepsilon + \frac{y_{aij}}{\rho}\right) = P \quad (1.16)$$

$$\sum_i \sum_j E_{btij} f\left(\varepsilon + \frac{y_{ij}}{\rho}\right) \times (\omega + y_{ij}) + \sum_i \sum_j E_{btij} f_a\left(\varepsilon + \frac{y_{aij}}{\rho}\right) \times (\omega + y_{aij}) = P(\omega + e) \quad (1.17),$$

де ρ – радіус кривизни вигнутої осі колони; ω – максимальний прогин колони; e – ексцентриситет навантаження; y_{ij} – координати центрів ділянок, на які розбито переріз елемента щодо головної осі перерізу.

Відповідно до [111], для розрахунку несучої здатності колон можна скористатися формулами – для центрально стислих і позацентрово стиснутих колон:

$$N = \sum_i R_{bif} + \sum_i \gamma_{aj} R_a f_a \quad (1.18),$$

де R_b – міцність бетонних зразків після комбінованих випробувань; R_a – нормативний опір робочої арматури; γ_a – коефіцієнт зниження нормативного опору арматури.

Методика розрахунку, запропонована в [112], передбачає використання формул для позацентрово стиснутих залізобетонних колон:

$$N = \varphi a (\sum_i R_{bif} + \sum_i \gamma_{aj} R_a f_a) \quad (1.19),$$

де a – коефіцієнт, що зважає на вплив температури на поздовжній вигин колони; φ – коефіцієнт поздовжнього вигину.

За результатами досліджень [107, 110], обґрунтовано процедури розрахунково-експериментального методу для визначення несучої здатності позацентрово стиснутої залізобетонної колони та критерії, за якими аналізують несучу здатність за стандартної температури пожежі. На підставі отриманих даних визначено несучу здатність залізобетонної колони.

На нашу думку, описані методи не виявляють помітних недоліків у ході вогневих випробувань, вони порівняно дешеві, менш трудомісткі, гнучкі й

універсальні. Проведення лабораторних досліджень підвищує їхню достовірність. Такі методи мають широкі перспективи, проте їхній розвиток гальмує відсутність чітких перевірених експериментальних і розрахункових методик, що поширюються на всі елементи залізобетонних конструкцій. Методи дають змогу отримати результати на основі простих математичних виразів, можуть бути легко автоматизовані й не вимагають високої кваліфікації персоналу.

Окрім переваг, експериментально-розрахункові методи мають певні недоліки. Ідеться насамперед про відсутність універсальності, оскільки метод може бути застосований тільки для стиснутих елементів залізобетонних конструкцій. Цей недолік можна усунути, якщо зважати, що під час розгляду схем руйнування втрата несучої здатності зігнутих елементів конструкцій у ході пожежі настає в разі вичерпування ресурсу опору в стиснутій зоні бетону, унаслідок зменшення опору деформації арматурної сталі, що не має розкиду теплофізичних і міцнісних параметрів через технологічну спадковість.

Спільним недоліком експериментально-розрахункових методів є необхідність використання малих зразків для випробувань, що зумовлює потребу в додатковому дослідженні переходу від цих зразків до реальних конструкцій. Ці дослідження вимагають ретельної експериментальної роботи, зокрема випробування елементів реальних конструкцій. Інший серйозний недолік – відсутність єдиних вимог до експериментального обладнання для реалізації режиму випробувань, що зважав би на граничні ефекти: тертя торців зразків, вплив тріщинуватої структури зразка, вплив нерівномірності нагріву та ін.

1.3. Перспективи створення нового експериментально-розрахункового методу прогнозування вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій

Аналіз методів оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій слугує підставою для виокремлення основних недоліків кожного з них. У табл. 1.6 систематизовано основні недоліки й переваги описаних методів.

Основні переваги та недоліки підходів до оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій

Підхід до оцінювання вогнестійкості		Переваги	Недоліки
Експериментальний підхід	Натурні експерименти	Наочність і точність відтворення реальних процесів, що відбуваються під час пожежі	<ul style="list-style-type: none"> – трудомісткість і висока вартість; – можливість урахувати лише пожежне навантаження, а не особливості матеріалів та швидкість поширення полум'я; – попри реальність об'єкта, розмір макета не обов'язково збігається з майбутніми розмірами; після будівництва навантаження на конструкції може змінитися внаслідок, наприклад, підвищеної поверховості будівлі; – неможливість аналізу змін, що можуть відбутися на етапі будівництва.
	Визначення вогнестійкості в спеціальних вогневих печах	Можливість аналізувати умови, за яких виготовлені окремі елементи будівельних конструкцій, а також особливості матеріалів, із яких створено бетон, оскільки за експериментальних методів використовують реальні будівельні конструкції	<ul style="list-style-type: none"> – у ході випробування будівельних конструкцій усіх типів замовник має змогу змінювати навантаження; – під час випробувань колон можливі похибки, оскільки замовник має змогу випробовувати зразки без навантаження взагалі й не брати це до уваги в ході оформлення протоколів; якщо навантаження наявне, то лише гравітаційне, що оминає увагою круті моменти, які створюються боковими навантаженнями на колону; – у процесі випробування плит до істотної похибки можуть призвести обмежені вимоги до розташування та способу прикладення навантажень; – допустиме випробування фрагментів конструкцій (наприклад, стін), тому граничні умови навантаження й кріплення зразка не увідповіднені з граничними умовами реального елемента, що буде застосований на об'єкті будівництва; – метод випробувань у спеціальних установках, як і натурні експерименти, є трудомістким, вартісним та екологічно небезпечним.

Експериментально-розрахунковий підхід	<p>Позбавлені недоліків, характерних для методів, заснованих на вогневих випробуваннях, і для розрахункових методів, оскільки вони порівняно дешеві, менш трудомісткі, гнучкі й універсальні; водночас лабораторні дослідження підвищують їхню достовірність; відсутність чітких перевірених експериментальних і розрахункових методик, що поширюються на всі елементи залізобетонних конструкцій. Методи дають змогу отримати результати на основі простих математичних виразів, можуть бути легко автоматизовані, не вимагають високої кваліфікації персоналу.</p>	<p>– відсутність універсальності, оскільки може бути застосований тільки для стиснутих елементів залізобетонних конструкцій; – використання малих зразків для випробувань, що породжує необхідність у додатковому дослідженні переходу від цих зразків до реальних конструкцій; – відсутність єдиних вимог до експериментального обладнання, для реалізації режиму випробувань, що зважав би на граничні ефекти: тертя торців зразків, вплив тріщинуватої структури зразка, вплив нерівномірності нагріву та ін.</p>
Розрахунковий підхід	<p>Спрощені методи мають високу продуктивність та не вимагають особливої підготовки до розрахункових процедур. Уточнені моделі дають змогу аналізувати пластичні властивості матеріалів і задавати початкове напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій. Це є перевагою, оскільки за допомогою обчислювальних алгоритмів уможлиблює оцінювання межі вогнестійкості, автоматизацію розрахунку; у разі достатньої кваліфікації спеціаліста та потужності комп'ютерної техніки можуть забезпечити високу точність, за порівняно низької вартості кінцевого результату.</p>	<p>– методи оминають увагою ключові особливості складових частин залізобетону, а саме структурний, фазовий і хімічний склад бетону, що зумовлюють особливості його поведінки в умовах комбінованої дії механічного навантаження та нагрівання від вогневої дії пожежі; – важко схарактеризувати особливості крупного заповнювача, оскільки його добувають у різних місцях; навіть за різних приблизно рівних може розширюватися неоднаково, що неможливо передбачити без реального експерименту; – аналогічна ситуація і з мілким заповнювачем, оскільки в різних регіонах його структура неоднакова;</p>

Продовження таблиці 1.6

Розрахунковий підхід		<p>– можливе використання морського або річкового піску, що впливає на міцність конструкції та поведінку під час нагрівання;</p> <p>– без експериментальних (вогневих) випробувань неможливо з'ясувати, як поводитимуться добавки до бетону під час нагрівання: наприклад, пластифікатори можуть створювати їдкий дим, а морозостійкі добавки сприяти появі тріщин тощо.</p>
----------------------	--	--

Отже, табл. 1.6 засвідчує, що не існує уніфікованого способу оцінювання вогнестійкості елементів будівельних конструкцій. Найбільш перспективними вважаємо експериментально-розрахункові методи, оскільки точність і порівняно невисока вартість поєднувані з можливістю аналізувати особливості виготовлених будівельних конструкцій.

На цій підставі можна провести експериментальні дослідження для визначення температурних розподілів у малогабаритному елементі залізобетонної конструкції, провести розрахунок міцності повномасштабної конструкції через відновлення температурних полів та аналіз навантаження, що впливатиме на конкретний елемент конструкції під час пожежі.

Відповідно до запланованого експериментально-розрахункового методу, процес оцінювання вогнестійкості конструкцій передбачає два основні етапи:

- проведення експериментальної частини, що прогнозує виготовлення компактних зразків та вогневі випробування;
- математичне оброблення результатів експериментів, що має на меті апроксимувати дані експериментів на реальні конструкції.

На рис. 1.15 продемонстровано загальний алгоритм зазначеного методу.

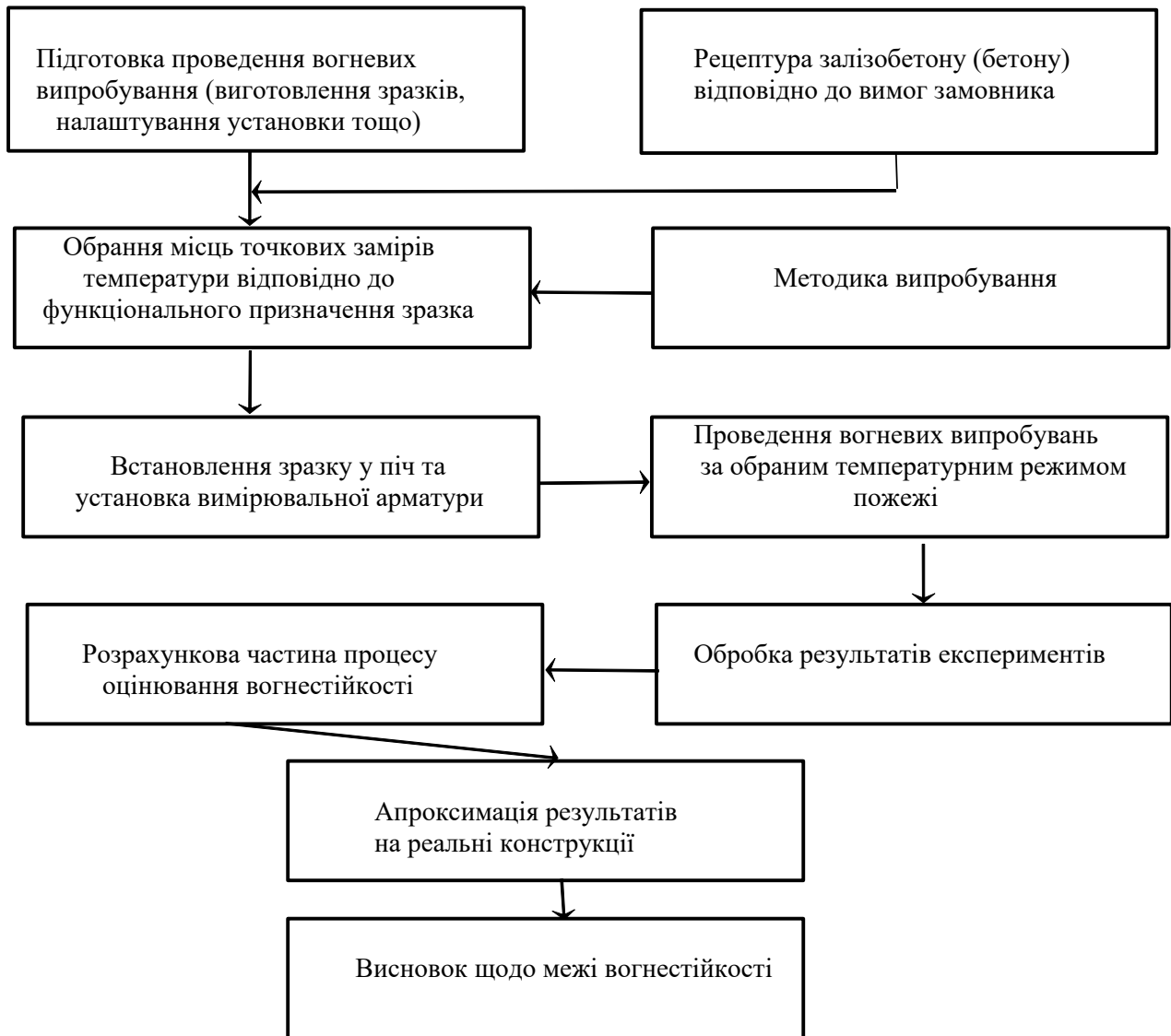


Рисунок 1.15 – Загальний алгоритм експериментально-розрахункового оцінювання залізобетонних будівельних конструкцій на основі випробувань малогабаритних елементів.

Як зображено на рис. 1.15, заплановано поєднання експериментальної і розрахункової частин. Експериментальна частина вможливує оцінювання матеріалу, із якого виготовлено конструкцію, та особливостей її розміщення в майбутній споруді. Розрахункова частина передбачає вивчення майбутніх силових навантажень, з огляду на експериментальні дані. У такий спосіб можна досягнути

точності розрахунку, зважаючи на розміри й умови роботи залізобетонної конструкції в будівлі.

Висновки до розділу 1

Проаналізовано сучасні підходи до оцінювання вогнестійкості елементів будівельних конструкцій та окреслено актуальні напрями досліджень.

Під час пожежі необхідно зважати на спільну роботу елементів та на роботу кожного елемента. Будь-яке порушення цілісності одного з видів конструкцій призводить до зниження міцності іншого й можливого обрушення будівлі або її частини. Для забезпечення необхідного часу евакуації людей та роботи підрозділів ОРС ЦЗ потрібно дотримуватися нормативних вимог до вогнестійкості конструкцій. Вогнестійкість визначають за допомогою кількох методів, що постійно вдосконалюють і змінюють. Водночас на сьогодні не зафіксовано універсального методу.

Проаналізовано переваги й недоліки підходів до оцінювання вогнестійкості. Використання фрагментів зразків для випробувань за експериментальних методів зумовлює необхідність додаткового розрахунку, відповідно до реальних розмірів конструкцій. Розрахункові методи не дають змоги проаналізувати особливості виготовлення та матеріалів, що входять до складу залізобетону.

Серйозним недоліком є відсутність єдиних вимог до експериментального обладнання для реалізації режиму випробувань, що зважав би на граничні ефекти: тертя торців зразків, вплив тріщинуватої структури зразка, вплив нерівномірності нагріву та ін.

Запропоновано розроблення нового експериментально-розрахункового методу прогнозування вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій, що передбачає поєднання експериментальної та розрахункової частин. Експериментальна частина вможливує оцінювання матеріалу, із якого виготовлено конструкцію, та особливостей її розміщення в майбутній споруді. Розрахункова частина спрямована на вивчення майбутніх силових навантажень, з

огляду на експериментальні дані. Такий підхід дає змогу досягнути точності розрахунку, зважаючи на розміри й умови роботи залізобетонної конструкції в будівлі.

У подальших розділах роботи необхідно виявити закономірності зміни температурних полів у перерізах елементів залізобетонних будівельних конструкцій в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі, обґрунтувати на основі виявлених закономірностей методики встановлення температурних розподілень за результатами точкових вимірювань температури у внутрішніх шарах елементів цих конструкцій за умов теплового впливу пожежі, а також розробити спеціальну установку для визначення точкових значень, необхідних для проведення розрахунків.

Сформульовано мету й завдання дослідження. Мета дослідження – створення системи, що об'єднує експериментальні та розрахункові методи оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій через розкриття закономірностей зміни теплових процесів і напружено-деформованого стану залізобетону під впливом спільної дії механічних та теплових навантажень.

Завдання:

- проаналізувати сучасні підходи до оцінювання вогнестійкості елементів будівельних конструкцій та окреслити актуальні дослідницькі напрями (виконано в першому розділі);

- виявити закономірності зміни температурних полів у перерізах елементів залізобетонних будівельних конструкцій в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі; обґрунтувати на основі виявлених закономірностей методики встановлення температурних розподілень за результатами точкових вимірювань температури у внутрішніх шарах елементів цих конструкцій за умов теплового впливу пожежі;

- розробити математичні моделі теплової печі для випробувань фрагментів елементів залізобетонних будівельних конструкцій та виявити закономірності впливу конструктивних параметрів печі на теплові процеси під час

вогневих випробувань; обґрунтувати конструктивні параметри печі, за яких відбуваються найбільш якісні вогневі випробування, – як перший елемент створення системи оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій;

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

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

– за отриманими експериментальними даними визначити температурні розподілення в перерізах елементів залізобетонних будівельних конструкцій та дослідити їхню адекватність;

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

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

РОЗДІЛ 2

АПРОКСИМАЦІЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ РОЗПОДІЛІВ ТОЧКОВИХ ЗАМІРІВ ТЕМПЕРАТУРИ В ЕЛЕМЕНТАХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІД ЧАС ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ

2.1. Загальні відомості про методи інтерполяції

Для оброблення результатів експериментів, діагностики параметрів або ідентифікації стану об'єктів за вимірними параметрами стану координат використовують переважно точкові наближення. Інтерполяція (із лат. *interpolation* – зміна, перероблення) – наближене або точне перебування будь-якої величини за відомими окремими значеннями цієї величини, тобто відновлення (точне або наближене) функції за її кількома відомими значеннями [113].

Методи інтерполяції диференціюють на локальні та глобальні. Для локальної інтерполяції на кожному інтервалі (x_i, x_{i+1}) будують окремий поліном. У разі глобальної інтерполяції добирають єдиний поліном на всьому інтервалі (a, b) [114]. При цьому шуканий поліном називають інтерполяційним поліномом.

Найвідоміші методи локальної інтерполяції: кусково-постійна інтерполяція; кусково-лінійна інтерполяція; сплайн-інтерполяція (квадратичні, кубічні сплайни та ін.). За кусково-постійної інтерполяції побудована функція є розривною, що обмежує її застосування. Для використання кусково-лінійної інтерполяції необхідно розглядати інтервал, що містить три й більше вузлові точки. Аналогічним способом можна побудувати інтерполяційний поліном другого порядку, тобто параболу, або більш складну нелінійну функцію [115–123].

Найбільш відомі методи глобальної інтерполяції [124–128]: ступеневий багаточлен (поліном); поліном Лагранжа; поліном Ньютона; поліноми Ерміта; поліноми Чебишева; тригонометричні поліноми й ін. Зі збільшенням кількості вузлів зростає і ступінь інтерполяційного полінома, що призводить до різкого збільшення похибки. Унаслідок цього виникає так зване явище хвилястості. Щоб

уникнути високого ступеня полінома, відрізок інтерполяції розбивають на кілька частин, на кожному інтервалі будують самостійний поліном невисокого ступеня [129–135].

Отже, для дослідження температурних розподілів (полів) під час прогрівання залізобетонних будівельних конструкцій доцільно застосовувати кусково-лінійну інтерполяцію [128]. Її використання передбачає перпендикулярну площину, тому в ході експериментальних досліджень необхідно забезпечити максимальну рівномірність прогріву обігрівальної поверхні фрагментів конструкцій. Цей підхід уможливує використання лише однієї площини для замірів углиб елемента та оперування отриманими даними для будь-якого геометричного розміру елемента [129].

Необхідно виявити закономірності зміни температурних полів у перерізах усіх основних елементів залізобетонних будівельних конструкцій в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі, оскільки прогрів може відбуватися з однієї, трьох або з чотирьох сторін, для різного типу конструкцій [120]. Варто досліджувати плити та стіни разом, тому що прогрів відбувається з одного боку, а балки й колони – окремо.

2.2. Апроксимація температурних розподілень за лініями контрольних точок у перерізах залізобетонних елементів за одностороннього теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі

Для розв'язування теплотехнічної задачі найбільш поширеним вважають підхід, за якого теплофізичні характеристики матеріалів несучих стін і плит є температурними залежностями й комплексно описують усі складні фізико-хімічні процеси, що відбуваються в матеріалах у разі їх нагрівання. Матеріали несучих стін мають переважно пористий каркас із певним умістом вологи [136–155]. Для пористого каркаса характерна гідрокристалічна будова. Процес нагріву супроводжуваний випаровуванням, конденсацією і фільтрацією вологи в рідкому та газоподібному стані. У такому разі теплофізичні характеристики не мають прямого фізичного змісту, їх називають

ефективними. Цей підхід дає змогу отримати достатньо точні результати, тому набув поширення. За таких умов рівняння теплопровідності називають квазілінійним [130–136], що записують у вигляді:

$$c_p(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda(T)\nabla T) \quad (2.1)$$

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

Для розв’язування рівняння теплопровідності (2.1) використовують граничні умови III роду [136–160]:

$$-\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r} = \alpha(T_p - T_w) \quad (2.2),$$

де α – коефіцієнт теплообміну, Вт/(м²·град); T_p , T_w – температури пожежного середовища й поверхні стіни, °С; r – поточна просторова координата.

Коефіцієнт теплообміну зважає на дію конвекції та інфрачервоного випромінювання, що визначають за формулою [136–160]:

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_{k(n)} \quad (2.3),$$

де α_p – коефіцієнт теплообміну від випромінювання; $\alpha_{k(n)}$ – коефіцієнт теплообміну конвекцією.

Для вивчення розподілень температури по перерізу несучих стін і плит під час вогневих випробувань потрібно застосувати розрахункову методику, засновану на розв’язуванні рівняння (2.3) із граничними умовами III роду (2.2).

Математичну модель теплопередачі описано в працях [136–160]. Використано рівняння теплопровідності в такому вигляді:

$$Cv(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (2.4),$$

де $Cv(T) = \rho(T)c_p(T)$ – питома об’ємна теплоємність.

Вираз (2.4), який відповідає ГУ III роду на обігрівній поверхні, записують у вигляді [136–160]і:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=b} = \alpha_k (T_p - T_w). \quad (2.5)$$

На необігрівній поверхні стіни вираз (2.5) ГУ III роду записують у вигляді [136–160]:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_n (293 - T_n), \quad (2.6),$$

де α_k, α_n – коефіцієнти теплообміну на обігрівній та необігрівній поверхні, що визначають за формулою (2.6).

Згідно з рекомендаціями [103], конвективний складник коефіцієнта теплообміну можливо прийняти рівним:

$\alpha_k = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – поверхня, що обігривається;

$\alpha_n = 6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – поверхня, що не обігривається,

а радіаційний обчислити за визначити з виразом:

$$\alpha_p = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{T_w^4 - T_p^4}{T_w - T_p} \quad (2.7),$$

де ε – ступінь чорноти поверхні матеріалу стіни $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4)$ – константа Стефана – Больцмана.

Задачу розв'язано відповідно до алгоритму, описаного вище, із застосуванням формул (2.1) – (2.5). Результати зіставлено з даними, що отримані внаслідок розрахунку для ГУ III роду. На рис. 2.1 подано результати розрахунку [162].

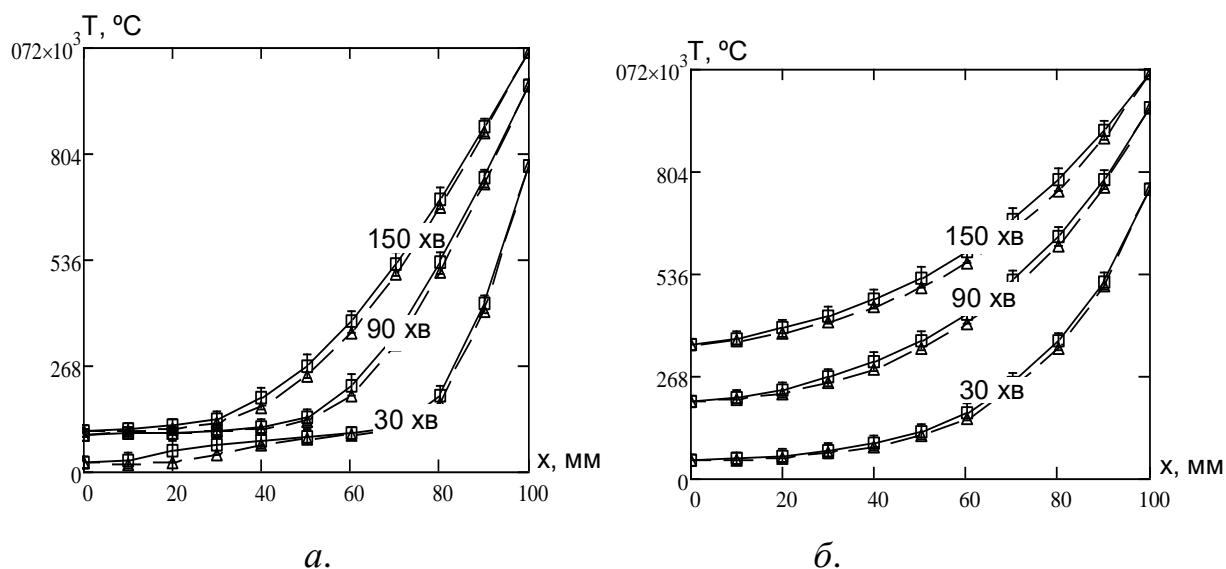


Рисунок 2.1 – Графіки температури прогріву внутрішніх шарів стіни 100 мм із бетону на легкому заповнювачі (а), із панелей із бетону на гранітному заповнювачі (б) для різних моментів часу: $\square\square\square$ – вихідні дані; $\triangle\triangle\triangle$ – дані, отримані внаслідок інтерполяції.

Аналіз графіків на рис. 2.1 засвідчив, що дані, отримані внаслідок застосування запропонованого методу інтерполяції, є достатньо точними, оскільки перебувають у межах експериментальної похибки.

Початкова температура матеріалу стіни та навколишнього середовища $T_0 = 293$ К.

Температуру пожежі визначають за формулою (1.1), яка виражає стандартний температурний режим пожежі.

Для цієї задачі граничні умови на обігрівній поверхні стінового елемента записують у вигляді:

$$T|_{x=b} = T_W. \quad (2.8)$$

На необігрівній поверхні стіни вираз (1.6) ГУ III роду записують у вигляді:

$$T|_{x=0} = T_n \quad (2.9),$$

де T_W, T_n – середні значення температур на обігрівній і необігрівній поверхнях у контрольні моменти часу, що отримують протягом випробувань за показниками термопар, згідно з методикою випробувань, яка описана в нормативних документах [156–159].

Недолік цього підходу полягає в тому, що для розв’язування задачі теплопровідності потрібно окремо добирати часовий і просторовий кроки. Автоматичне добирання кроків ускладнене великими стрибкоподібними змінними значеннями теплоємності й теплопровідності матеріалів, із яких виконано елементи, що нагріваються з одного боку [162; 171–174].

Для практичної реалізації розрахунку можна застосувати номограмний метод. За такого методу температурні розподілення представлені афінними кривими, що описані подібними функціоналами, де відрізняються тільки значення їхніх параметрів. Аналіз кривих, поданих на рис. 2.1, дає змогу висловити припущення, що вони можуть бути афінними [162; 171–174].

Для апроксимації застосовано алгоритм, заснований на представленні температурних кривих узагальненим виразом [162; 171–174]:

$$T_{k,i} = T_{0k} + (T_{\max k} - T_{0k}) \left[\frac{i}{n} \right]^{Q_k} \quad (2.10),$$

де $T_{k,i}$ – температура i -тої точки перерізу стіни (див рис. 2.1) у k -тий момент часу;

$T_{0k}, T_{\max k}$ – температура першої та останньої точок у k -тий момент часу;

n – кількість інтервалів між контрольними точками; Q_k – показник ступеня параболи в k -тий момент часу, що визначають за алгоритмом, поданим на рис. 2.2.

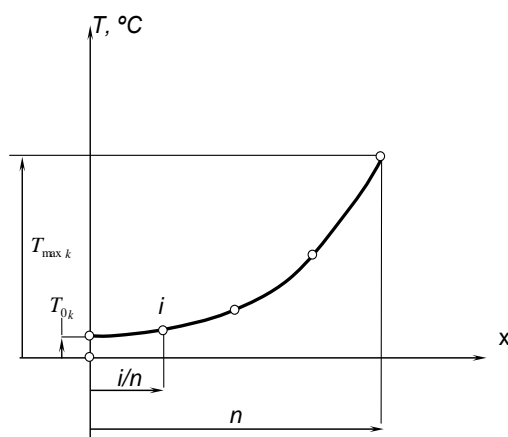


Рисунок 2.2 – Схема апроксимації температурних розподілів стін під час випробувань вогнестійкості

На рис. 2.3 подано графіки, для яких характерна особливість, що полягає в наявності локальних максимуму та мінімуму на ділянці між 15 і 30 хвилинами. Така особливість найбільш яскраво виражається для стін із легкого бетону. Явище пояснюють інтенсивним випаровуванням і фільтрацією вільної вологи крізь пори матеріалу каменів та розчину. Аналіз поданих графіків засвідчує, що їх можна апроксимувати й описати функціоналом із трьома змінними параметрами a , b , c типу [162]:

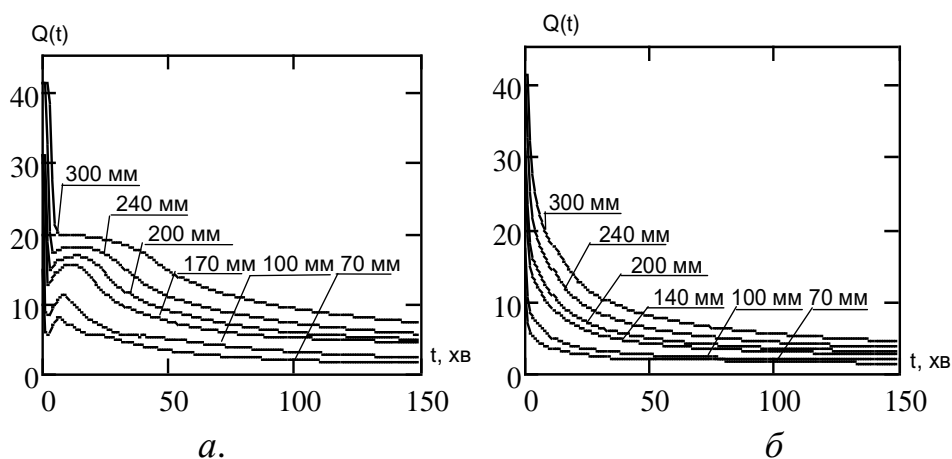


Рисунок 2.3 – Графіки залежностей часу показника ступеня параболи від часу для стін із блоків із бетону на легкому заповнювачі (а), із панелей із бетону на гранітному заповнювачі (б) для різної товщини

$$Q_k = a \exp(b \cdot (k_{\max} - k) + c). \quad (2.11)$$

Для визначення коефіцієнтів виразу (2.11) був застосований алгоритм Левенберга – Марквардта [176–179]. Блок-схему подано на рис. 2.4. В алгоритмі J – матриця Якобі:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f(w_1, x_1)}{\partial w_1} & \dots & \frac{\partial f(w_R, x_1)}{\partial w_R} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f(w_1, x_N)}{\partial w_1} & \dots & \frac{\partial f(w_R, x_N)}{\partial w_R} \end{pmatrix} \quad (2.12).$$

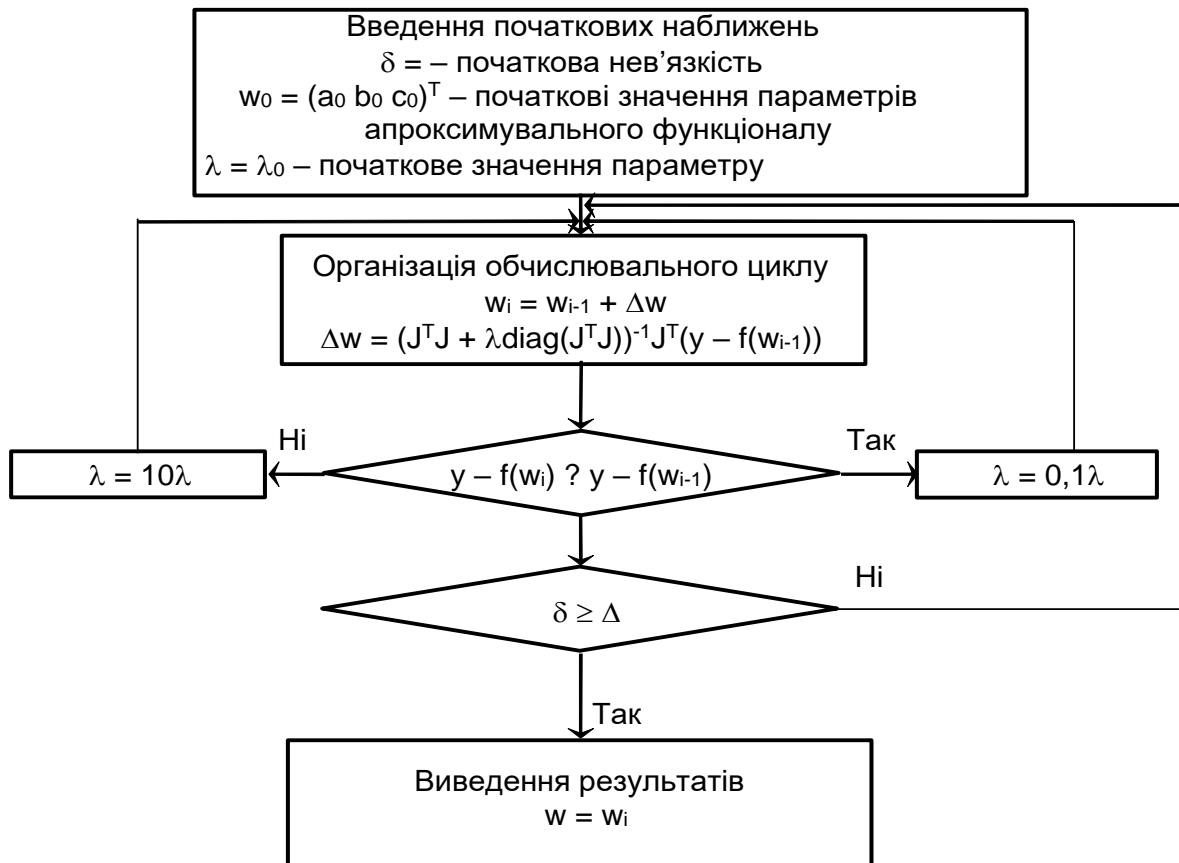


Рисунок 2.4 – Блок-схема алгоритму Левенберга – Марквардта визначення коефіцієнтів регресійної функції

Розраховано коефіцієнти апроксимувального функціонала (2.12) для стін з інших матеріалів. Результати розрахунку представлено на рис. 2.5.

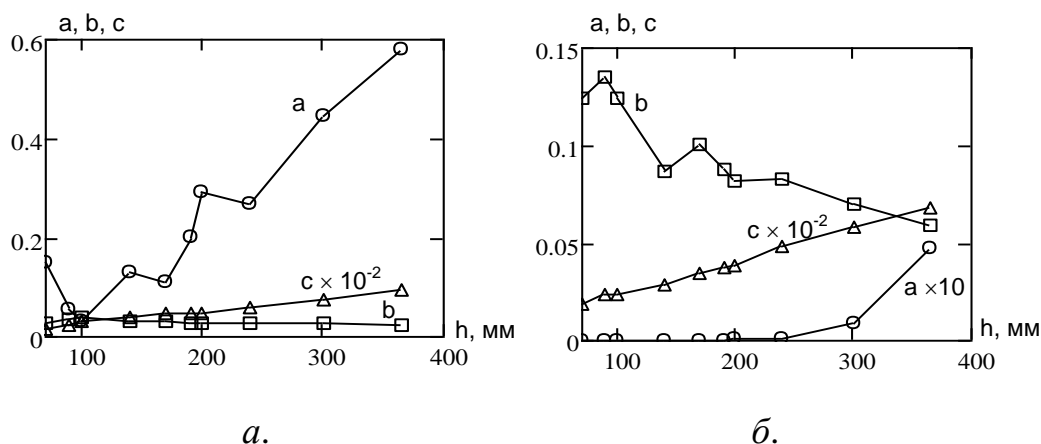


Рисунок 2.5 – Графіки залежностей від часу коефіцієнтів

апроксимувального функціонала (2.16) у залежності від товщини стіни: із блоків із бетону на легкому заповнювачі (а), із панелей із бетону на гранітному заповнювачі (б) із різною товщиною

На рис. 2.5 подано результати розрахунку за використання виразу та (2.11). Аналіз отриманих результатів доводить, що функціонал не повною мірою може відображати наявність локальних максимуму та мінімуму. Якщо зважати на те, що інтервал від 15 до 30 хв. не впливає на настання граничного стану (у цьому інтервалі він ніколи не настає), можна попередньо визнати ефективність запропонованого методу апроксимації. Це дає змогу використати отримані результати для визначення температурних розподілів із застосуванням виразу (2.11).

На рис. 2.6 подано результати розрахунку розподілу температурних полів із використанням виразів (2.11) і (2.12). Отримані результати засвідчують високу точність, оскільки відхилення перебувають у межах допустимої експериментальної похибки.

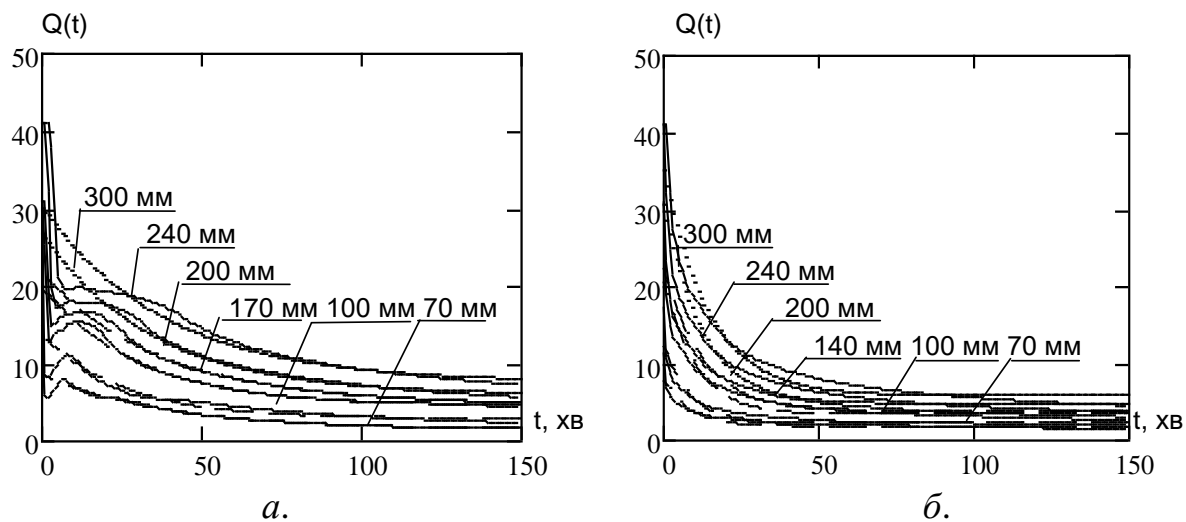


Рисунок 2.6 – Графіки залежностей часу показника ступеня параболи від часу для стін із блоків із бетону на легкому заповнювачі (а), із панелей із бетону на гранітному заповнювачі (б) для різної товщини: суцільна лінія – вихідні дані, пунктирна – результат апроксимації

Отримані результати можна використовувати для розрахунку температурних розподілень у стінових елементах за вимірними температурними показниками на поверхнях під час випробувань вогнестійкості цих елементів.

Розподілення температур у стіновому елементі, що зазнав стандартного вогневого випробування, визначають за показниками температури, які отримані внаслідок прямих вимірювань протягом випробувань, із використанням такої формули:

$$T_{k,i} = T_{w2k} + (T_{w1k} - T_{w2k}) \chi^{a_h \exp(b_h \cdot (k_{max} - k) + c_h)} \quad (2.13),$$

де T_{w1k} , T_{w2k} – температури обігрівної та необігрівної поверхонь стіни, що зазнає випробування, у k -тий момент часу; a_h , b_h , c_h – коефіцієнти регресії, у відповідності з певною товщиною для стіни з цього матеріалу; k , k_{max} – поточний і максимальний дискретний час випробування, що визначають через інтервал 1 хв.

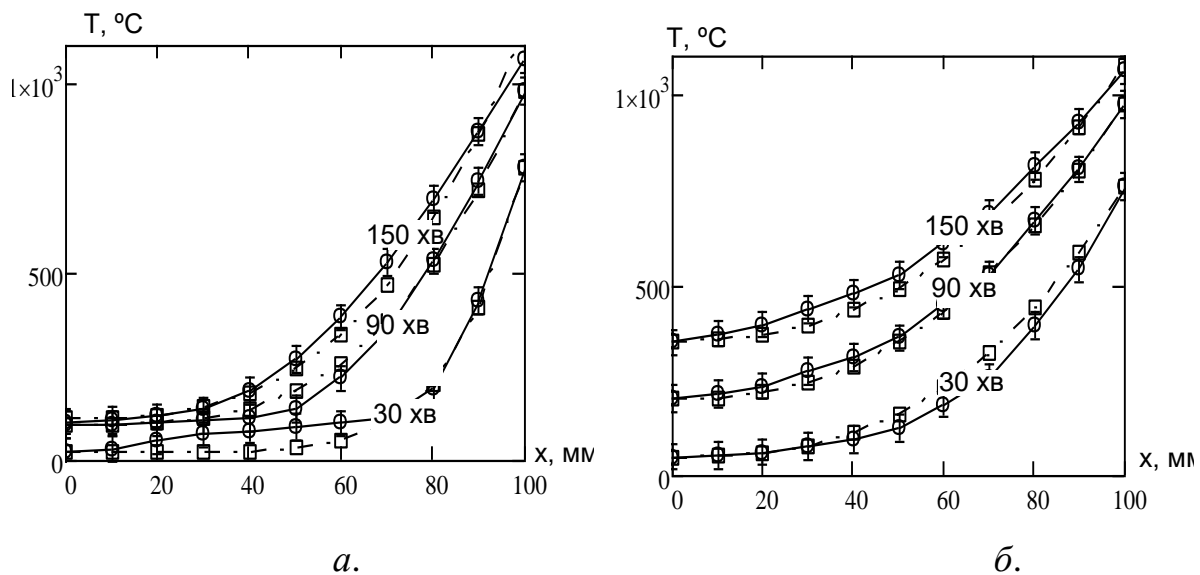


Рисунок 2.7 – Графіки температури прогріву внутрішніх шарів стіни 100 мм із блоків із бетону на легкому заповнювачі (а), із панелей із бетону на гранітному заповнювачі (б) для різних моментів часу: $\circ\circ\circ$ – вихідні дані; $\square\square\square$ – дані, отримані внаслідок інтерполяції

Коефіцієнти регресії визначають за таблицями [103], що увідповіднені з графіками на рис. 2.7. У разі невідповідності товщини стіни табличним значенням коефіцієнти регресії можна визначити через лінійну інтерполяцію.

2.3. Апроксимація температурних розподілень залізобетонних елементів за чотирьохстороннього теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі

Для вивчення температурних даних у внутрішніх шарах залізобетонних колон можна використати результати вогневих випробувань. У працях [136–139] запропоновано великий обсяг експериментальних даних щодо показників температур у контрольних точках перерізу залізобетонних колон під час їх нагрівання за стандартним температурним режимом пожежі. Досліджено переважно колони з квадратним перерізом. Схему розташування термопар зображено на рис. 2.8.

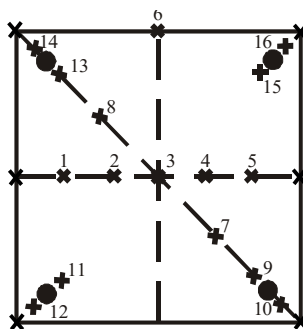


Рисунок 2.8 – Розташування термопар у перерізах залізобетонних колон (1 – 16 – номери контрольних точок у перерізі)

У роботі [139] та праці [180] подано результати вимірювань температур у внутрішніх шарах під час випробувань колон квадратного перерізу 300×300 , виготовлених із бетону різних типів. На рис. 2.9 зображено розподілення температур по горизонтальній лінії вимірювання (див. рис. 2.6).

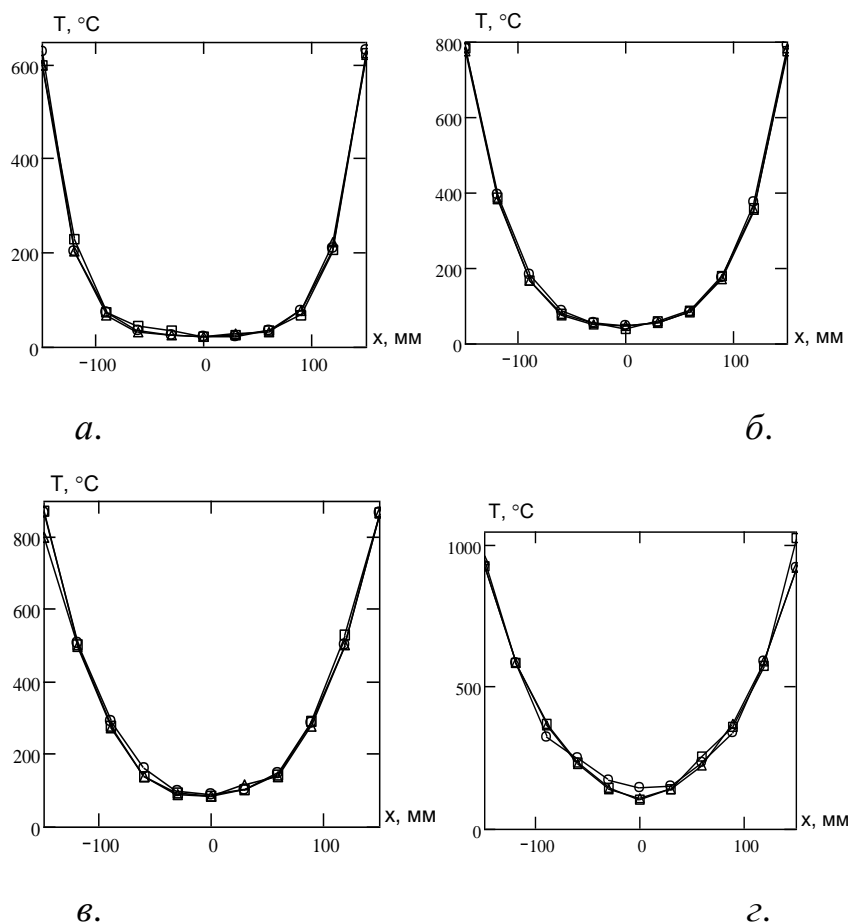


Рисунок 2.9 – Температурні розподіли по горизонтальній лінії розташування термопар у перерізах 3 зразків залізобетонних колон 300×300 з важкого бетону в

різні моменти часу дії «стандартної» пожежі: а – на 30 хв.; б – на 60 хв.; в – на 90 хв.; г – на 120 хв.

Вигляд температурних розподілень, поданих на рис. 2.9, увідповіднений із параболічними залежностями, що є аналогічним до стінових елементів, але більш складним, оскільки прогрів колон чотиристоронній. Ці залежності запропоновано апроксимувати за виразом (2.10).

Для визначення апроксимувального виразу типу (2.10) потрібно дібрати оптимальний показник ступеня параболу q через мінімізацію середньоквадратичної нев'язності:

$$q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \sum [T_{iM} - T_{iE}]^2 \rightarrow \min \quad (2.14),$$

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

Для розв'язування задачі з пошуку оптимуму був використаний метод покрокового спуску. Блок-схему алгоритму подано на рис 2.10.

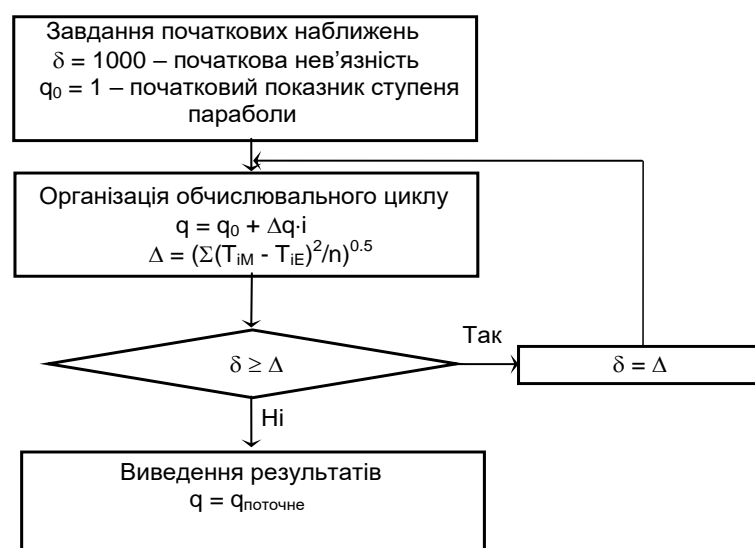


Рисунок 2.10 – Блок-схема алгоритму визначення апроксимаційного поліному.

Після розрахунків знайдено апроксимувальні залежності, за якими побудовані графіки температурних розподілень, що зображено на рис. 2.11. Графіки на рис. 2.11 засвідчують, що отримані результати дуже близькі до залежностей, які були отримані експериментальним шляхом [136–139].

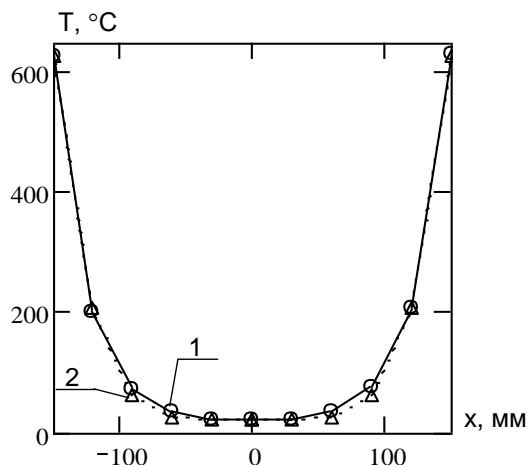


Рисунок 2.11 – Результати апроксимації температурного розподілення для моменту часу 30 хв. дії «стандартної» пожежі: 1 – експериментальні дані; 2 – результати апроксимації

На рис 2.11 подано результати апроксимації температурних розподілень з усередненою експериментальною залежністю разом із похибкою експериментальних даних.

Адекватність отриманих даних визначено за кількома критеріями. Згідно з рекомендаціями в працях [181–183], як критерії адекватності запропоновано використовувати абсолютне й відносне відхилення, а також F-критерій (критерій Фішера), значення не перевищили табличні.

Рівняння (2.6) може бути розв’язане тільки чисельними методами [116–119; 188–191]. Одним із найефективніших є метод кінцевих різниць [116–119; 188–191], що апроксимує похідні кінцевими різницями температур (потенціалів) у вузлових точках. У разі квазілінійного рівняння теплопровідності для врахування нелінійності коефіцієнтів застосовують інтегро-інтерполяційний метод [116–119; 188–191].

Для апроксимації лівої частини рівняння теплопровідності з точністю $O(h^2 + \Delta t)$ використовують приблизну рівність [107, 110]:

$$A_{i,k} = C_V(T) \frac{\partial T}{\partial t} = C_V \left(\frac{T_{i,k} + T_{i,k+1}}{2} \right) \cdot \frac{T_{i,k+1} - T_{i,k}}{\Delta t} \quad (2.15).$$

Права частина рівняння (2.15) із точністю $O(h^2 + \Delta t)$ апроксимується за явною адитивною схемою [88; 89]:

$$\begin{aligned} B_{i,k} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) = a_x T_{i-1,k}^x - (a_x + b_x) T_{i,k}^x + b_x T_{i+1,k}^x, \\ C_{i,k} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) = a_y T_{i-1,k}^y - (a_y + b_y) T_{i,k}^y + b_y T_{i+1,k}^y \end{aligned} \quad (2.16),$$

де коефіцієнти за температур визначають із використанням інтегро-інтерполяційного методу [107; 110]:

$$\frac{1}{a} = h \int_0^{\Delta h} \frac{dh}{\lambda(T)} = \frac{(\lambda(T_{i-1}) + \lambda(T_i)) h^2}{\lambda(T_{i-1}) \lambda(T_i)}, \quad \frac{1}{b} = h \int_0^{\Delta h} \frac{dh}{\lambda(T)} = \frac{(\lambda(T_{i+1}) + \lambda(T_i)) h^2}{\lambda(T_{i+1}) \lambda(T_i)} \quad (2.17).$$

За використання виразів (2.15) – (2.17) застосовують рекурентну формулу для обчислення температури в i -тій вузловій точці для $k+1$ -го часового шару за даними k -того часового шару. Рекурентну формулу записують у неявному вигляді, тому на кожному етапі розв'язують як нелінійне рівняння.

Коефіцієнт теплопровідності бетону записують у вигляді, рекомендованому в [103]:

$$\lambda = 2 - 0,2451 \frac{T}{100} + 0,0107 \left(\frac{T}{100} \right)^2 \quad (2.18).$$

Питома об'ємна теплоємність у вигляді:

$$\begin{aligned}
 C_v &= \rho(T) \cdot 900 \text{ при } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C}, \\
 C_v &= \rho(T)(900 + (T - 100)) \text{ при } 100^\circ\text{C} < T \leq 200^\circ\text{C}, \\
 C_v &= \rho(T)(1000 + 0,5(T - 100)) \text{ при } 200^\circ\text{C} < T \leq 400^\circ\text{C}, \\
 C_v &= \rho(T) \cdot 1100 \text{ при } 400^\circ\text{C} < T \leq 1200^\circ\text{C}
 \end{aligned}
 \tag{2.19}$$

Для розрахунку температурних полів у перерізі колони методом кінцевих різниць цей переріз дискретизований, як зображено на рис. 2.12. Під час розрахунку достатньо розглянути 1/8 частину перерізу [107].

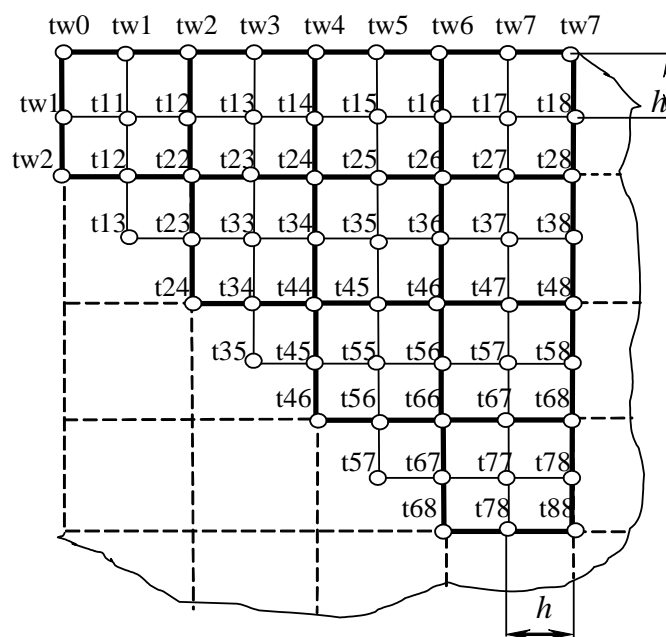


Рисунок 2.12 – Схема дискретизації 1/8 перетину залізобетонної колони за її всебічного обігріву

Формули (2.15) – (2.19) зумовлюють те, що на кожному часовому шарі необхідно застосовувати комплекс неявних рекурентних формул у вигляді рівнянь:

$$A_{i,k} = B_{i,k} + C_{i,k} \quad (2.20).$$

Для їх розв'язання використано відомий метод половинного ділення, реалізований за алгоритмом, що запропонований у [107; 110], за обмежень, накладених на одержувані корені діапазоном можливих температур нагріву зразків.

ГУ III роду апроксимовані кінцевими різницями з точністю $O(h^2 + \Delta t)$ у вигляді [110]:

$$\frac{\lambda(T_{w_k})\lambda(T_{1,k})}{\lambda(T_{w_k}) + \lambda(T_{1,k})} \cdot \frac{T_{w_k} - T_{1,k}}{h} + \frac{h \cdot C_V(T_{1,k})}{2 \cdot \Delta t} \cdot (T_{1,k} - T_{1,k-1}) = \alpha_k (T_{1,k} - T_{p,k}) \quad (2.21),$$

де T_p – температура пожежі, відповідно до стандартного температурного режиму; визначають за формулою (1.1); α – коефіцієнт теплообміну; $h = 0.025$ м – крок розбиття перерізу; $\Delta t = 60$ с – часовий крок.

Співвідношення між часовим і просторовим кроком вибрано з умови збіжності неявної обчислювальної схеми. Також часовий крок повинен дорівнювати часовому кроку температурних вимірювань.

Після розрахунків отримано температурні розподіли, що зображено на рис. 2.13. Аналіз отриманих температурних розподілень засвідчив, що поверхні, утворені ними, є фігурами, які мають вигляд параболоїдів.

Згідно з отриманими температурними розподіленнями, запропоновано виконувати їх інтерполяцію за трьома способами. Інтерполяцію за першим способом варто проводити за апроксимацією ліній, утворених фронтальними перерізами, параболічними залежностями типу (2.10). Відповідно до другого способу, інтерполяція відбувається за апроксимацією твірних поверхні температурного розподілу параболічними залежностями типу (2.10). Третій спосіб полягає в апроксимації ліній ізотерм афінними кривими та їх побудові в кожній точці дискретизованого перерізу. За положенням ізотерми визначають

температуру вузлової точки. Після інтерполяції відповідно до цих способів був визначений найбільш ефективний спосіб за адекватністю отриманих результатів.

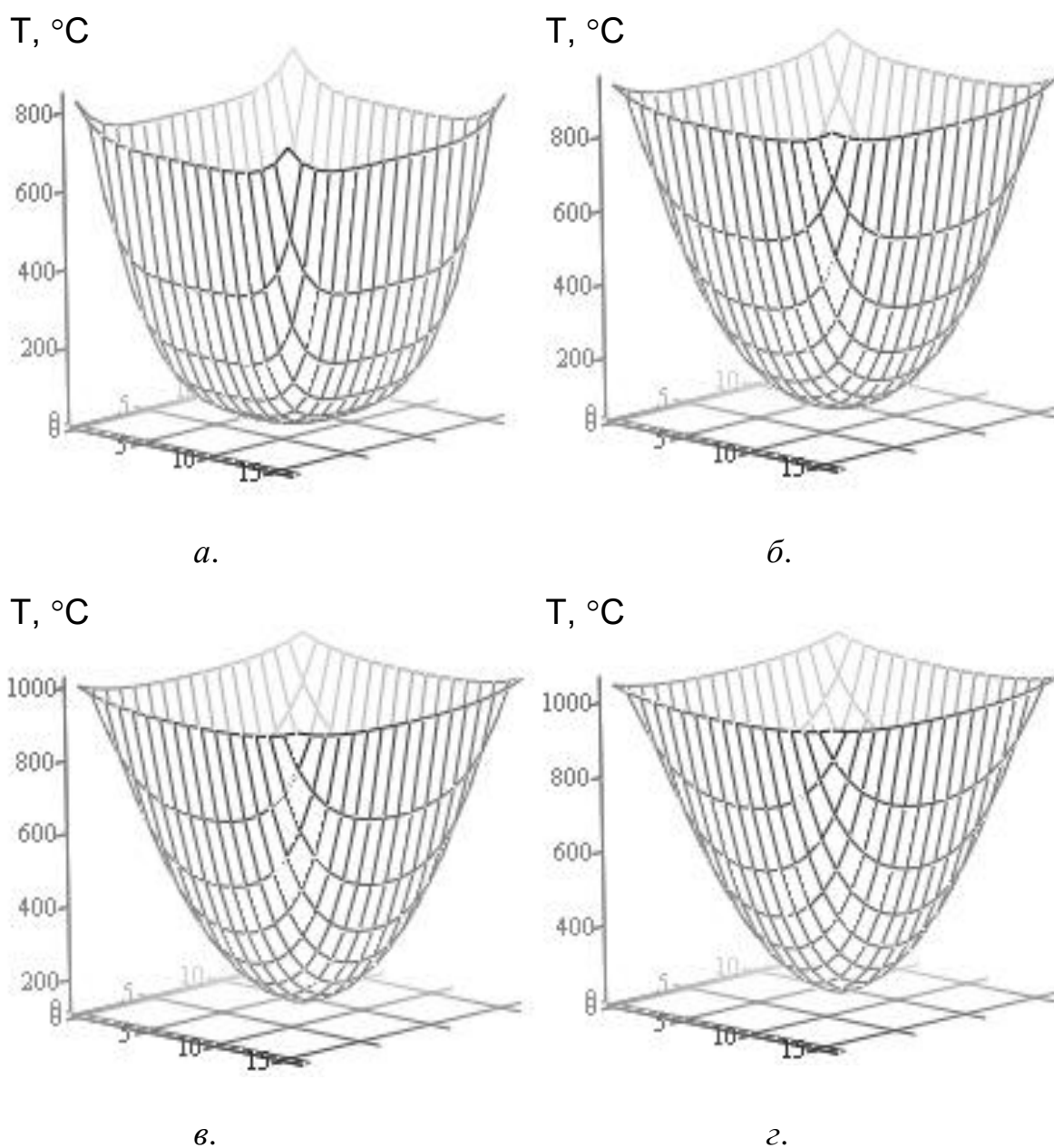


Рисунок 2.13 – Розрахункові температурні розподіли в перерізі залізобетонної колони 300×300 з важкого бетону в різний час дії «стандартної» пожежі: а – на 30 хв.; б – на 60 хв.; в – на 90 хв.; г – на 120 хв.

Унаслідок проведених розрахунків за розробленим алгоритмом, побудовано температурні розподіли для залізобетонної колони 300×300 мм із важкого бетону

на гранітному заповнювачі, що використані як початкові дані розрахунку (рис. 2.21). Узято до уваги дискретність контрольних точок вимірювання згідно зі схемою, подібною до схеми, що зображена на рис. 2.12.

Інший підхід полягає в побудові інтерполяційних кривих у вигляді парабол у кожній вузловій точці в радіальній площині, що проведена від нульової серединної точки перерізу до поверхні колони, тобто до межі перерізу. Показник ступеня параболи інтерполюється за його залежністю від тангенса кута нахилу площини до профільної площини поверхні температурного розподілення. На рис. 2.14 показано схему проведення інтерполяції.

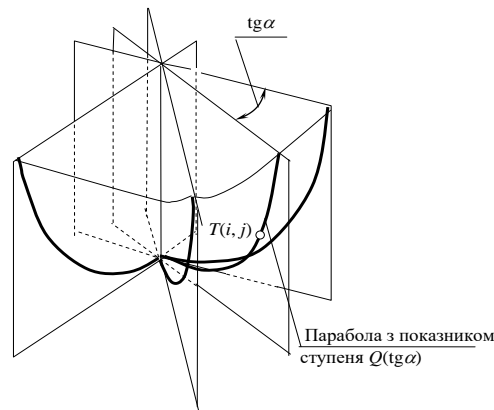


Рисунок 2.14 – Схема інтерполяції розподілів температур за другим способом

Ще один підхід полягає в наближенні сімейства кривих-ізотерм у перерізі залізобетонної колони за її нагрівання під час пожежі. Апроксимувальні функції можна записати в такому загальному вигляді [180]:

$$y(x) = q \left(1 - \left(\frac{x}{q} \right)^p \right)^{1/p} \quad (2.22),$$

де p і q – коефіцієнти, які підлягають визначенню під час наближення поверхні розподілення температур.

На підставі виразу (2.33) у параметризованому вигляді записано рівняння:

$$y = x_0 \left(1 - \left(\frac{x}{x_0} \right)^{p_0 - (p_{\max} - p_0)x_0^n} \right)^{\frac{1}{p_0 - (p_{\max} - p_0)x_0^n}} \quad (2.23),$$

де $p_0 = 1,5$, $p_{\max} = 15$ – мінімальний і максимальний показники ступеня функції, що апроксимує ізотерми; x_0 – початкове значення координати x функції, що апроксимує ізотерми; n – параметр, який зазнає оптимізації.

Ізотерми необхідно будувати в певній послідовності.

1. Визначення параметрів для значень температур головної вертикалі, горизонталі та діагоналі матриці відбувається за алгоритмом, який подано на рис. 2.32.

2. Розв'язання виразу (2.33) на кожній ітерації як рівняння щодо параметра x_0 для поточного параметра n .

3. Визначення за отриманими показниками поточних параметрів x_0 і n температури точок діагоналі з використанням виразів (2.10).

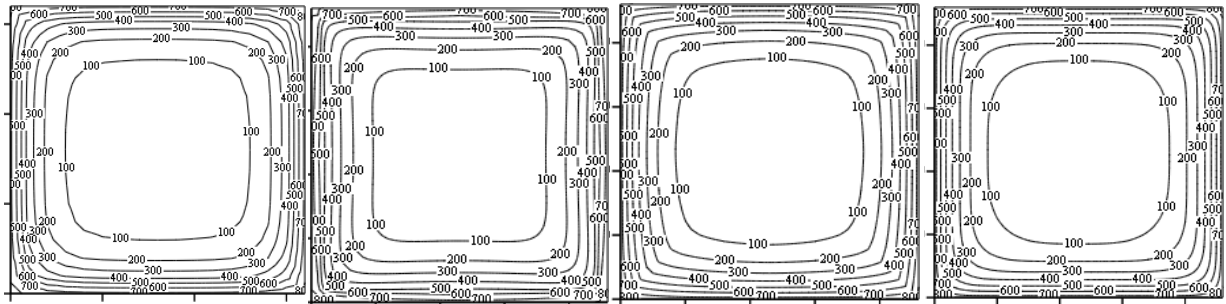
4. Варіювання параметру n , мінімізація середньоквадратичної нев'язності, пошук оптимального значення в кожен контрольний момент часу з використанням алгоритму, що увідповіднений із блок-схемою на рис. 2.10.

5. Розв'язання виразу (2.23) як рівняння на кожному контрольному моменті часу для кожної вузлової точки, застосування виразів (2.10), визначення розподілення температур.

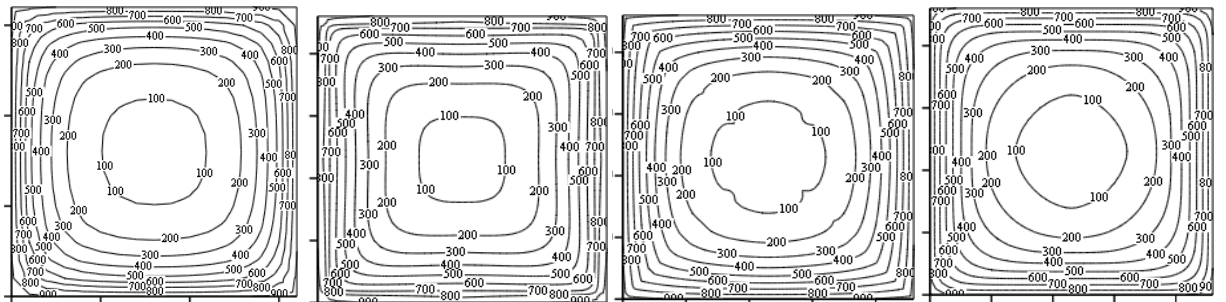
Рівняння (2.23) необхідно розв'язувати методом ітерацій.

На рис. 2.15 подано температурні розподілення досліджуваної колони, що отримані за трьома описаними методами інтерполяції [180].

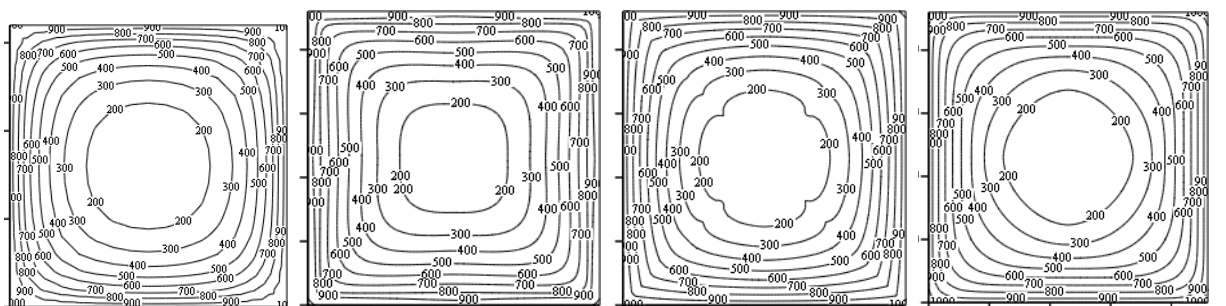
прямий розрахунок 1 метод інтерпол. 2 метод інтерпол. 3 метод інтерпол.



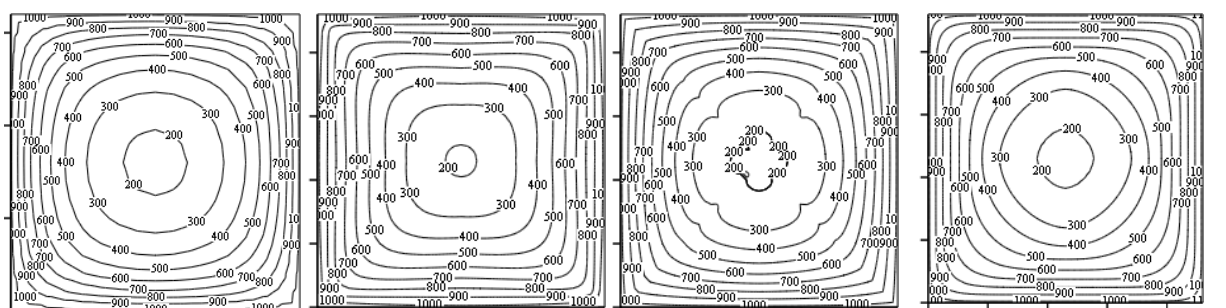
30 хв.



60 хв.



90 хв.



120 хв.

Рисунок 2.15 – Температурні розподіли в перерізі залізобетонної колони 300×300 з важкого бетону в різний час дії «стандартної» пожежі, що визначені за різними методами інтерполяції

Якщо порівнювати подані температурні розподіли, можна помітити, що отримані розподіли за першим методом інтерполяції мають досить завищені значення температур, ізотерми є менш заокругленими, на відміну від ізотерм, розподілів, що визначені внаслідок прямого розрахунку. Застосування другого підходу вможливилює більш точне наближення, однак поверхні температурних розподілів мають розриви за першою і другою похідними. Третій підхід дає гладкі поверхні температурних розподілів, але при цьому маємо суттєво завищені значення температур у кутових точках перерізу. Для більш точного аналізу варто зіставити початкові дані, що отримані за теоретичного підходу, й результати інтерполяції, отримані різними методами. Результати порівняльного аналізу подано в табл. 2.5.

Таблиця 2.1

Дані порівняльного аналізу результатів інтерполяції, отриманих за різними методами

Спосіб інтерполяції	Максимальне відхилення, °С	Середнє відносне відхилення, %	Середньоквадратичне відхилення, °С
1 спосіб	95	10,8	22,4
2 спосіб	67	5,2	11,4
3 спосіб	112	4,4	8,9

Табл. 2.1 засвідчує високу точність методів інтерполяції, однак найбільш точним є третій метод. Усі розроблені методи можливо застосовувати для наближення температурних розподілів за дискретними вимірюваннями температур у контрольних точках, де встановлено термопари.

Аналіз результатів інтерполяції температурних розподілів засвідчив, що контрольні точки мають бути розташовані за головними вертикаллю, горизонталлю та діагоналлю перерізу так, як зображено на рис. 2.16.

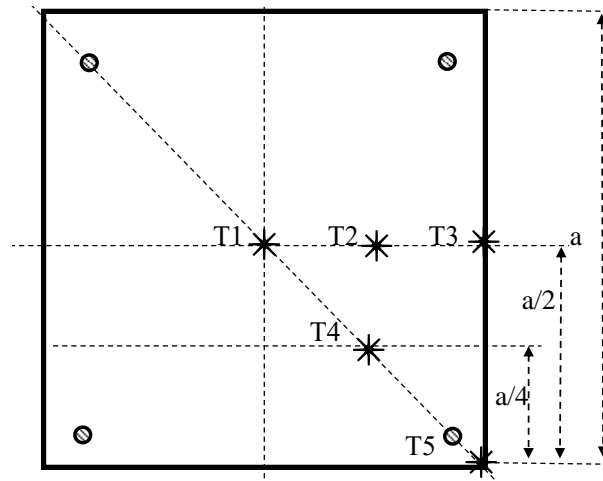


Рисунок 2.16 – Схема розташування термопар

Для остаточного обґрунтування розташування термопар у перерізі колони потрібно визначити їхню необхідну кількість. Особливості алгоритму інтерполяції за розробленими методами передбачають розміщення однакової кількості термопар за лініями їх розташування. Кількість термопар визначають через з'ясування похибки інтерполяції, залежно від кількості контрольних точок на лініях розташування термопар. Згідно з розрахунками, визначено залежності, що подані на рис. 2.17 у вигляді графіків.

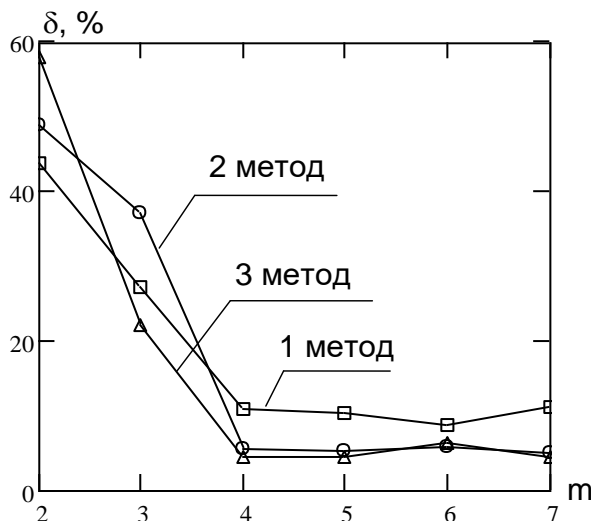


Рисунок 2.17 – Залежності похибки інтерполяції від кількості контрольних точок

Згідно з графіками на рис. 2.17, мінімальна кількість контрольних точок вимірювання температури в перерізі колони становить 3 та ще 2 на її поверхні.

2.4. Апроксимація температурних розподілень залізобетонних елементів за трьохстороннього теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі

У працях [136–139] представлено достатній обсяг даних, отриманих у ході високотемпературних випробувань для вимірювання температури в контрольних точках перерізів залізобетонних ригелів і балок, за високих температур у печах випробувальних установок, за стандартним температурним режимом пожежі. Досліджено переважно балки й ригелі з прямокутним перерізом. Схему розташування контрольних точок, де встановлені термопары для таких випробувань, зображено на рис. 2.18.

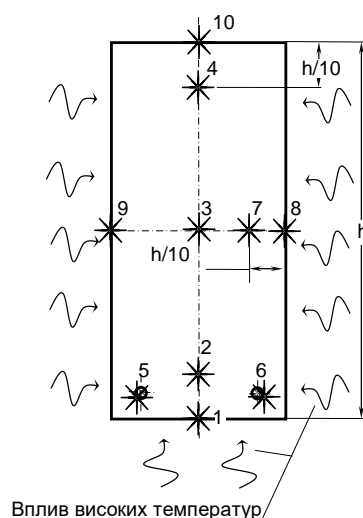


Рисунок 2.18 – Розташування термопар у перерізах залізобетонних балках (1 – 10 – номери контрольних точок у перерізі)

У роботі [181] схарактеризовано результати вимірювання температури у внутрішніх шарах ригелів прямокутного перерізу 300×150 , що виготовлені з

бетону різних типів. На рис. 2.19 подано розподілення температур по вертикальній лінії вимірювання (див. рис. 2.18).

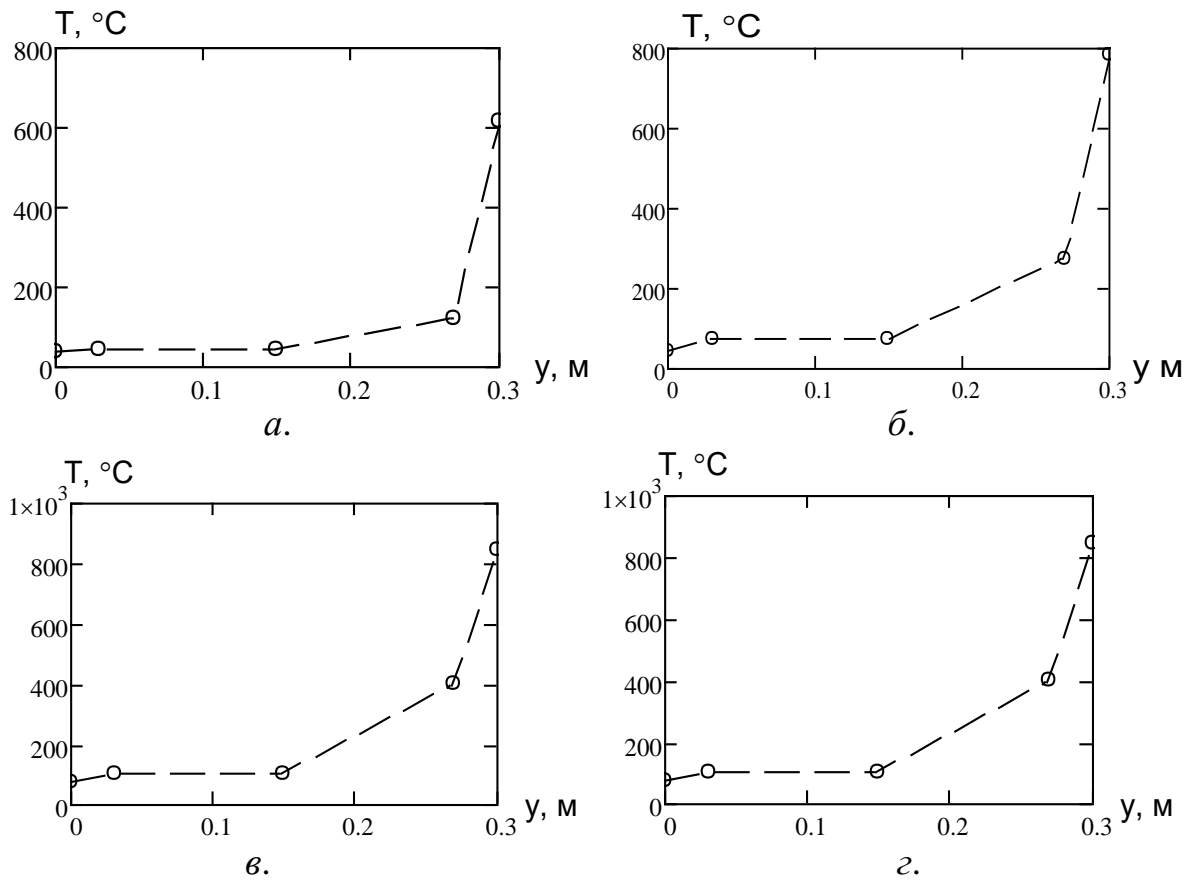


Рисунок 2.19 – Температурні розподіли по вертикальній лінії розташування термопар у перерізі залізобетонного ригеля 300×150 мм із важкого бетону в різний час дії «стандартної» пожежі: *a* – на 15 хв.; *б* – на 30 хв.; *в* – на 45 хв.; *г* – на 60 хв.

На рис. 2.20 подано розподілення температур по горизонтальній лінії вимірювання (див. рис. 2.18) для залізобетонного ригеля з прямокутним перерізом із важкого бетону (розміри 300×150). Характер розподілень засвідчує, що для них можна запропонувати апроксимувальні функціонали, які дають змогу відтворювати їх у різний час, із використанням температур у контрольних точках.

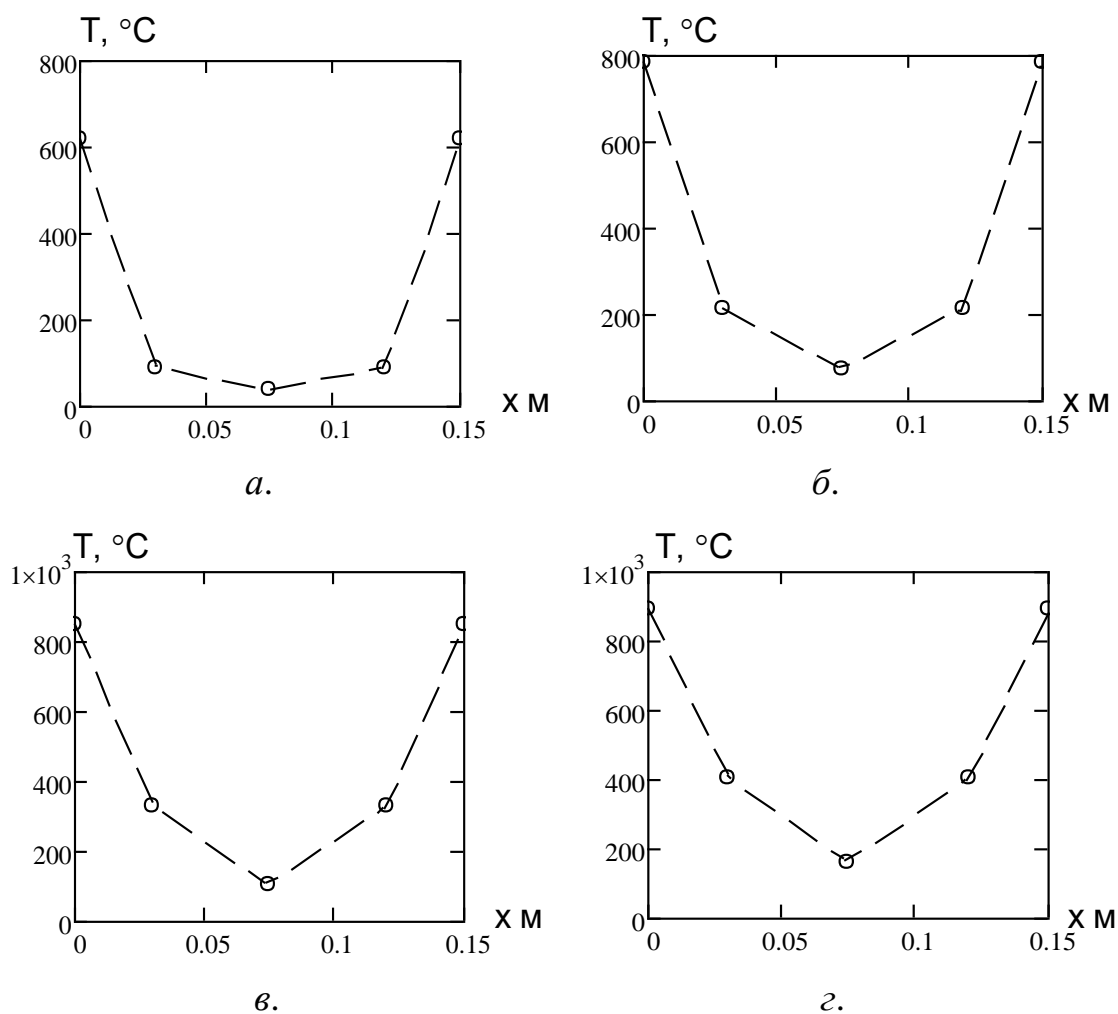


Рисунок 2.20 – Температурні розподіли по горизонтальній лінії розташування термопар у перерізі залізобетонного ригеля 300×150 мм із важкого бетону в різний час дії «стандартної» пожежі: *a* – на 15 хв.; *б* – на 30 хв.; *в* – на 45 хв.; *г* – на 60 хв.

Для апроксимації температурних розподілень, що представлено на рис. 2.19 і рис. 2.20, у працях [8–10; 192] обґрунтовано підхід, де поданий вираз, аналогічний до побудови кривих під час побудови температурних розподілів у стінових елементах та колонах. Підхід зважає на тристоронній обігрів балок, має такий вигляд аналогічний до колон, та описується формулою (2.10) та алгоритмом зображеним на рисунку 2.14.

На рис. 2.21 подано графіки температурних розподілень уздовж горизонтальної лінії контрольних точок (див. рис. 2.17).

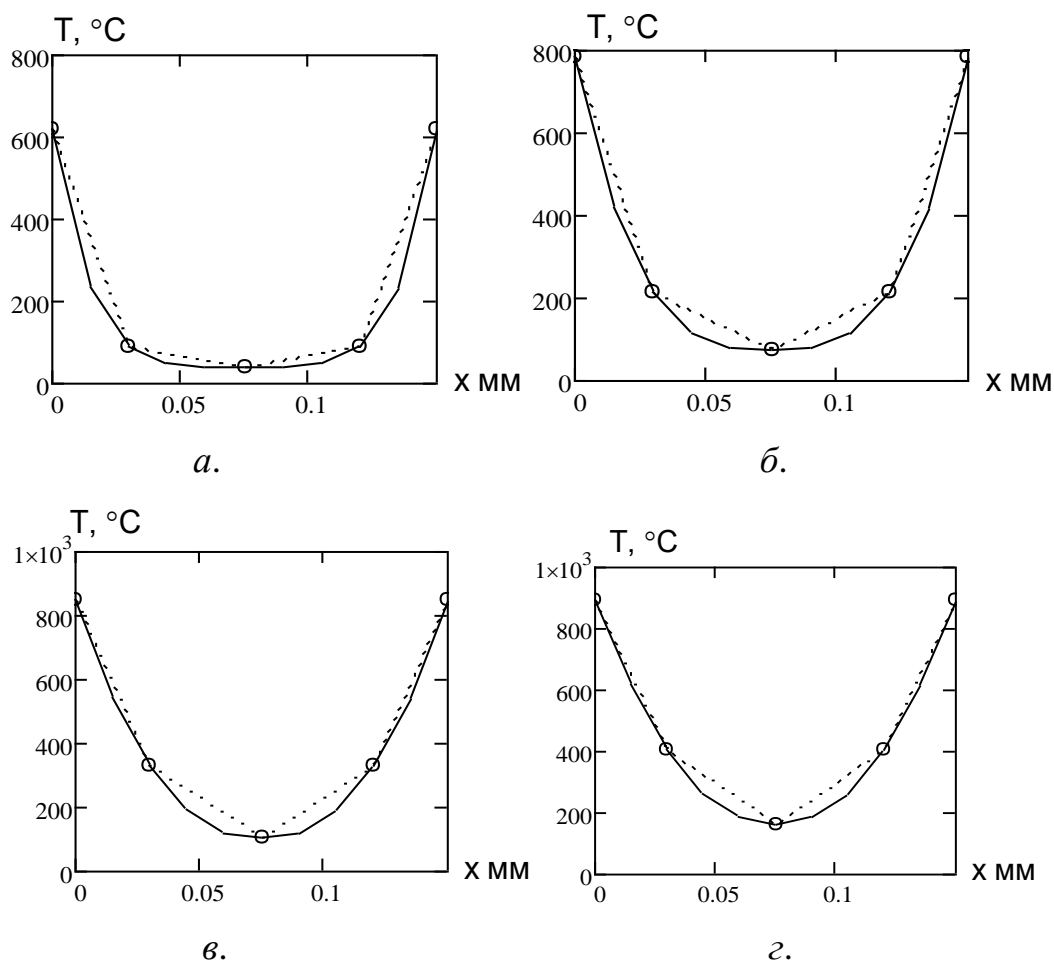


Рисунок 2.21 – Температурні розподіли, отримані через апроксимацію (суцільна лінія) по горизонтальній лінії розташування термопар у перерізі залізобетонного ригеля 300×150 мм із важкого бетону в різний час дії «стандартної» пожежі: *a* – на 15 хв.; *б* – на 30 хв.; *в* – на 45 хв.; *г* – на 60 хв.

Аналіз графіків рис. 2.21 засвідчує, що запропонований спосіб апроксимації температурних розподілень уздовж контрольних ліній за вимірюваннями в контрольних точках під час високотемпературних випробувань залізобетонних ригелів дає змогу отримувати адекватні дані, оскільки в усіх випадках критерій Фішера має істотно нижчі значення за табличні.

Адекватність результатів апроксимації визначено за рекомендаціями в працях [181–183].

Похибка становить не більше за 6 %, у середньому дорівнює 3,5 %. Середньоквадратичне відхилення даних апроксимації від усереднених даних за

всіма виборками сягає не більше як 8 °С. Це означає, що запропонований метод апроксимації достатньо точний.

Після отримання порядку кривизни парабол у вузлових точках головної діагоналі, для з'ясування температур у вузлових точках перерізу використовують лінійну інтерполяцію, як зазначено в попередньому пункті.

На підставі запропонованих способів розроблено алгоритм визначення температури у вузлових точках перерізу через інтерполяцію температур за температурними даними в контрольних точках перерізу. Блок-схему подано на рис. 2.22.

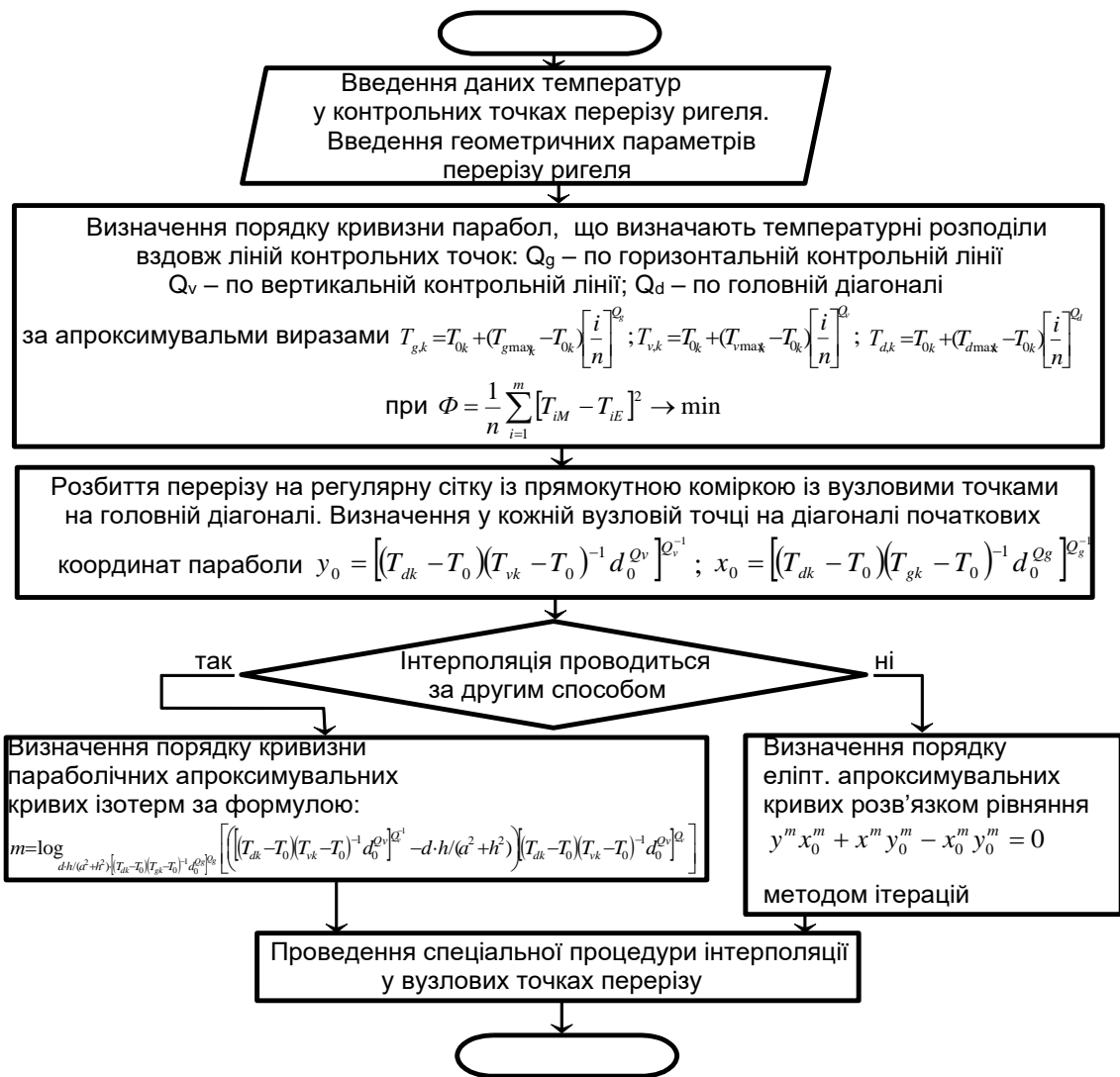


Рисунок 2.22 – Блок-схема алгоритму визначення температури у вузлових точках перерізу через інтерполяцію температур за температурними показниками в контрольних точках перерізу

Спеціальну процедуру інтерполяції реалізують відповідно до двох способів. Згідно з першим способом, проводять апроксимацію ізотерм еліптичного типу. Такий спосіб передбачає визначення координат, що належать до двох сусідніх ізотерм, побудованих унаслідок апроксимації. Точки повинні бути розташовані на промені, який проведений із початкової до поточної точки, де потрібно зафіксувати температуру. Поточна точка має перебувати між ізотермами. На підставі значень температури сусідніх ізотерм і координат поточної точки, точок на промені, між якими розташована точка, через лінійну інтерполяцію визначають температуру. Схема інтерполяції за першим способом подана на рис. 2.23.

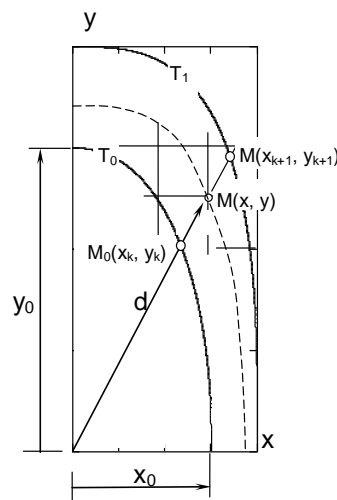


Рисунок 2.23 – Схема інтерполяції температури в перерізі фрагмента залізобетонного ригеля для першого способу апроксимації

Використання такого способу зумовлене тим, що довжину променя, проведеного до точки, яка розташована на апроксимованій ізотермі, визначають за прямою формулою [237–263]:

$$d_k = \frac{x_{0k} y_{0k}}{(x_{0k}^{m_k} + y_{0k}^{m_k})^{m_k^{-1}}} \quad (2.24).$$

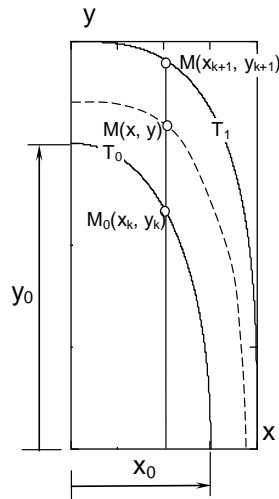


Рисунок 2.24 – Схема інтерполяції температури в перерізі фрагмента залізобетонного ригеля для другого способу апроксимації

Для другого способу апроксимації ізотерм формули, подібної до (2.24), не існує, тому такий підхід не може бути застосований. З огляду на це, розроблено інший спосіб, що варто реалізувати через обчислення координати y за виразом (2.10), використовуючи отриманий набір параметрів y_{0k} , x_{0k} , m_k уздовж вертикальної лінії з координатою x поточної точки, де фіксують температуру. Температуру поточної точки визначають через лінійну інтерполяцію між температурами сусідніх ізотерм, між якими вона перебуває, та за координатами точок перетину ізотерм і вертикальної лінії з координатою x поточної точки. Схему інтерполяції запропоновано на рис. 2.24.

У ході інтерполяції за обома способами використовують формулу [238]:

$$T_{p,q} = T_0 + (T_1 - T_0)(y_{k+1} - y_k)^{-1} y_{p,q} \quad (2.25).$$

Отже, розроблено способи інтерполяції температурних розподілень у залізобетонних ригелях на підставі вимірювання температури в контрольних точках перерізу під час високотемпературних випробувань за стандартним температурним режимом.

Для відпрацювання розроблених алгоритмів проведено інтерполяцію температурних розподілів для залізобетонного ригеля 300×150 мм із важкого бетону на гранітному заповнювачі, із застосуванням результатів розрахунків щодо виконання прямої задачі теплопровідності як початкових даних [239]. На рис. 2.25 представлено схему розбиття перерізу на вузлові точки, що увідповіднена з кінцево-різницевою схемою, яка використана для чисельного розв'язування рівняння теплопровідності. На схемі репрезентовано контрольні точки, де температури слугують початковими даними під час інтерполяції для половини перерізу ригеля в контексті його симетрії.

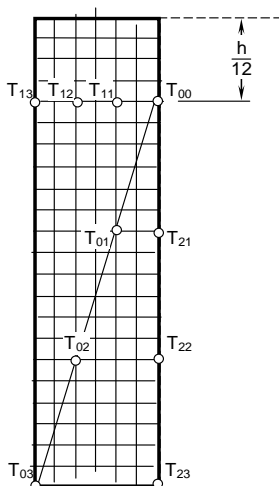


Рисунок 2.25 – Схема початкових даних для інтерполяції температурного розподілення в перерізі залізобетонного ригеля під час його нагрівання за стандартною температурною кривою пожежі

Початкова точка T_{00} вибрана для усунення несуттєвої крайової особливості, що не беруть до уваги для спрощення апроксимації.

На рис. 2.26 представлено графіки температури від часу в контрольних точках згідно з рис. 2.25.

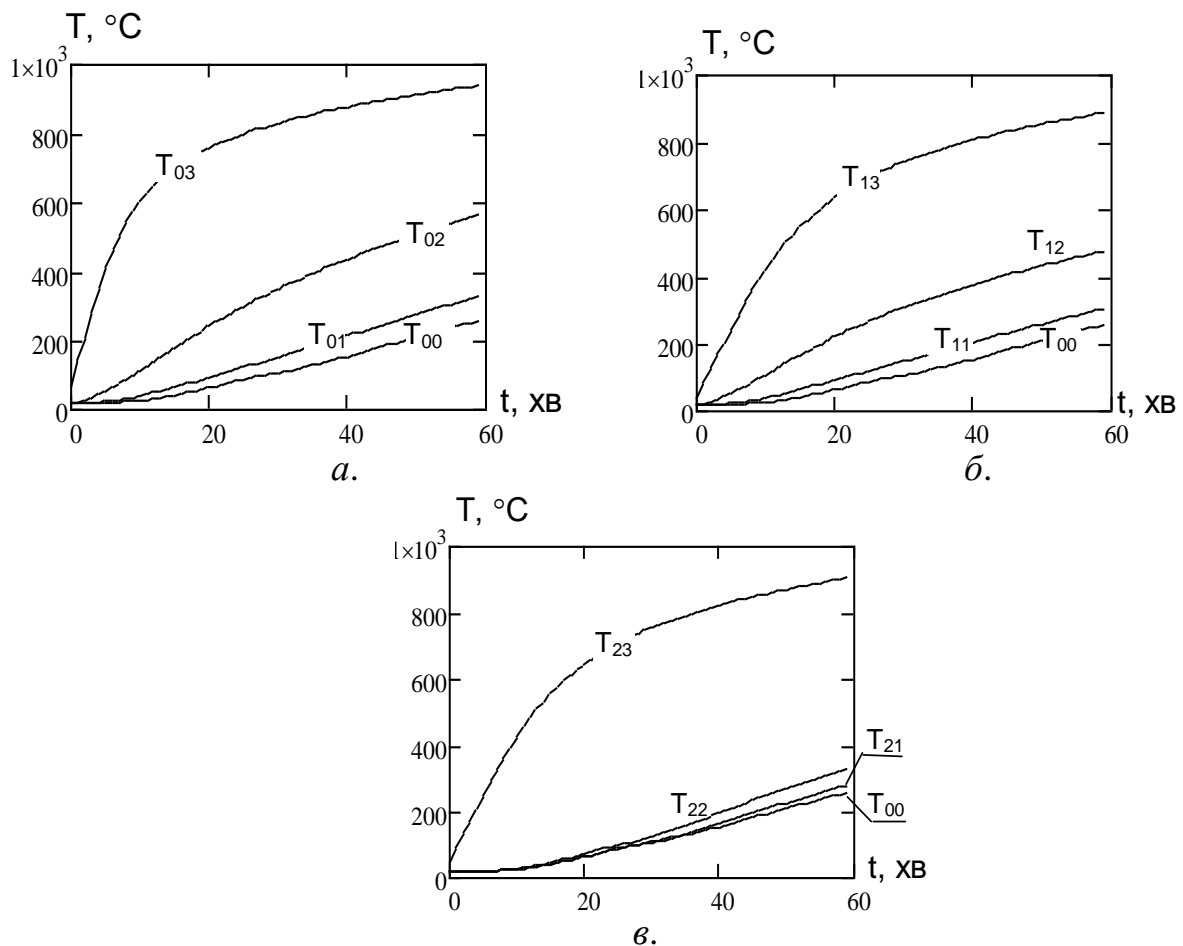


Рисунок 2.26 – Температурні режими в контрольних точках за різними контрольними лініями в перерізі ригеля: *a* – за головною діагоналлю; *б* – за серединною вертикаллю; *в* – за горизонталлю

Дані, за якими побудовані графіки температур у контрольних точках, використано для інтерполяції. Подані графіки повністю увідповіднені з уявленнями про процеси, що проходять у бетоні в разі його нагрівання, оскільки вони мають горизонтальну ділянку, увідповіднену з випаровуванням вільної вологи в порах бетону.

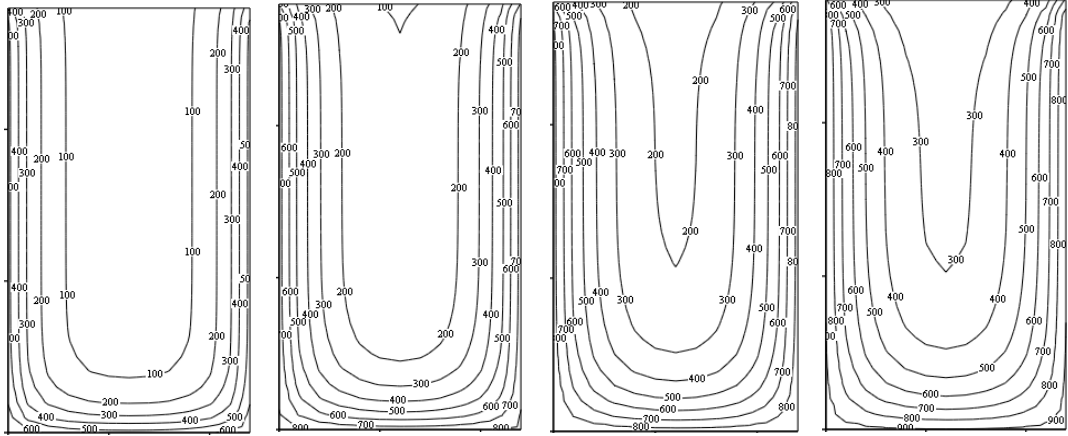
Для попереднього оцінювання адекватності результатів побудовано температурні поля в перерізі у вигляді ізоліній. На рис 2.27 подано побудовані температурні поля.

15 хв.

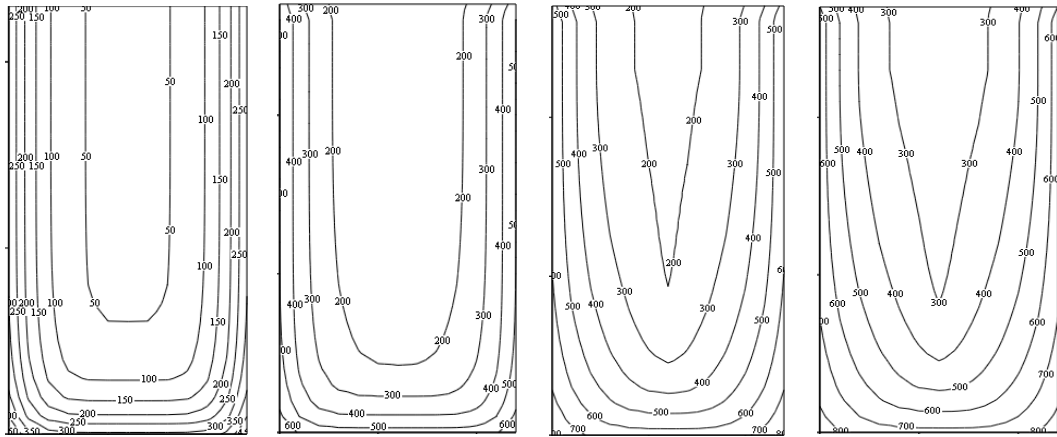
30 хв.

45 хв.

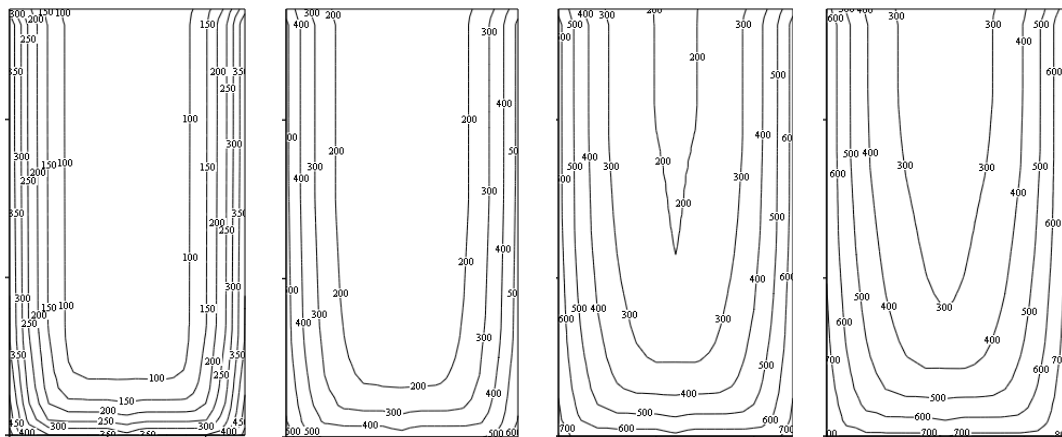
60 хв.



вихідні дані



1 спосіб



2 спосіб

Рисунок 2.27 – Температурні розподіли в перерізі залізобетонного ригеля 300×150 мм із важкого бетону в різний час дії «стандартної» пожежі, що зафіксовані за розробленими способами інтерполяції

Поверхні розподілів температури засвідчують, що внаслідок інтерполяції, виконаної обома способами, можна отримати однакові результати. Зафіксовано

помітну розбіжність форм одержаних поверхонь. Ізотерми за результатами, отриманими внаслідок інтерполяції, є менш заокругленими, ніж ізотерми розподілів, що визначені на підставі прямого розрахунку. Другий підхід уможливорює порівняно точне наближення, однак поверхні температурних розподілів мають розриви за першою і другою похідними.

Для більш точного аналізу зіставлено початкові дані, одержані за теоретичного підходу, і результати інтерполяції, отримані внаслідок застосування різних методів. Результати компаративного аналізу подано в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Дані порівняльного аналізу результатів інтерполяції, отриманих різними способами

Інтерполяції	Макс. відхилення, °С	Сер. відн. відхилення, %	Середньоквадр. відхилення, °С
1 спосіб	115	12,8	25,8
2 спосіб	76	8,4	18,9

Дані табл. 2.2 засвідчують високу точність методів інтерполяції. Водночас найбільш точним визнаний другий спосіб. Усі розроблені способи варто застосовувати для наближення температурних розподілів за дискретними вимірюваннями температур у контрольних точках, де встановлені термопари.

Аналіз результатів інтерполяції температурних розподілів засвідчив, що контрольні точки мають бути розташовані за головними вертикаллю, горизонталлю та діагоналлю перерізу так, як зображено на рис. 2.28. Також необхідно проаналізувати схему, що зумовлена стандартами [31, 103]. Розташування термопар згідно з чинними стандартами та розроблене запропоновано на рис. 2.28.

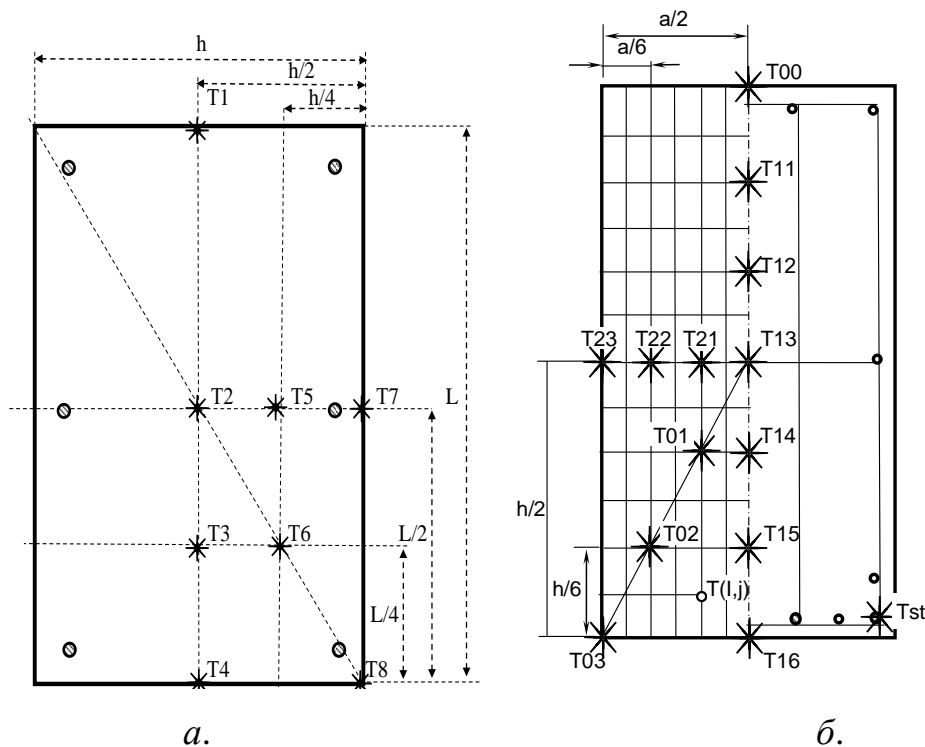


Рисунок 2.28 – Схеми розташування термопар і розбиття перерізу балки на зони: *а* – запропонована в дисертації; *б* – згідно з чинними стандартами щодо високотемпературних випробувань балок і ригелів

Особливість схеми розташування термопар полягає в тому, що контрольні точки на контрольних лініях розташовані по чотири на одну лінію, згідно з дослідженнями, описаними в роботі [264].

На підставі порівняння зроблено висновок, що остання схема, рекомендована в стандартах, має суттєві недоліки: температура добре контрольована в нижній чверті перерізу, тоді як інтерполяція температур у верхній частині ускладнена; схема передбачає використання набагато більшої кількості термопар (більше на 8 термопар), що суттєво підвищує трудомісткість і вартість підготовки зразка до випробувань; схема не є гнучкою і не може бути пристосована до геометричних особливостей балки.

У ході оцінювання ефективності стандартної схеми можна застосувати один із методів інтерполяції температурного розподілу в перерізі балки. Для цього потрібно використати дані в контрольних точках згідно зі схемою.

Для цієї схеми розташування термопар були розроблені дві методики інтерполяції з використанням запропонованих способів. Перша методика полягає у виконанні таких процедур:

- 1) за мінімізації функціоналу типу (2.10) визначити вигляд функції типу (2.25) через варіювання показника ступеня для контрольних ліній;
- 2) визначити вигляд апроксимаційного функціоналу для головної діагоналі з використанням знайдених проміжних значень на головній горизонталі та значення температури в контрольній точці на арматурному стержні;
- 3) визначити з використанням першого або другого способу параметри вузлових функціоналів, що наближають ізотерми.
- 4) визначити через інтерполяцію температуру у вузлових точках між ізотермами.

Другу методику реалізують за такими процедурами:

- 1) за використання мінімізації функціоналу через варіювання показника ступеня для контрольних ліній (рис. 2.22);
- 2) на підставі або першого, або другого способу визначити параметри вузлових функціоналів, що наближають ізотерми тільки в нижній чверті перерізу балки;
- 3) через інтерполяцію визначити температури у вузлових точках між ізотермами тільки у вузлових точках нижньої чверті перерізу балки;
- 4) перший рядок матриці використати для побудови матриці температур верхньої чверті перерізу ригеля, через її клонування для всіх горизонтальних ліній, на яких розташовані вузлові точки.

На рис. 2.29 подано температурні розподіли, отримані з використанням розроблених методик інтерполяції температур за даними в контрольних точках, розташованих за схемою, що представлена на рис. 2.28 б.

Аналіз даних на рис. 2.28 засвідчує, що використання 2 схеми розташування термопар (рис. 2.28) може бути ефективним у разі визначення температурного розподілення в перерізі залізобетонного ригеля. Найбільш точними є результати інтерполяції, що проведена за другою методикою.

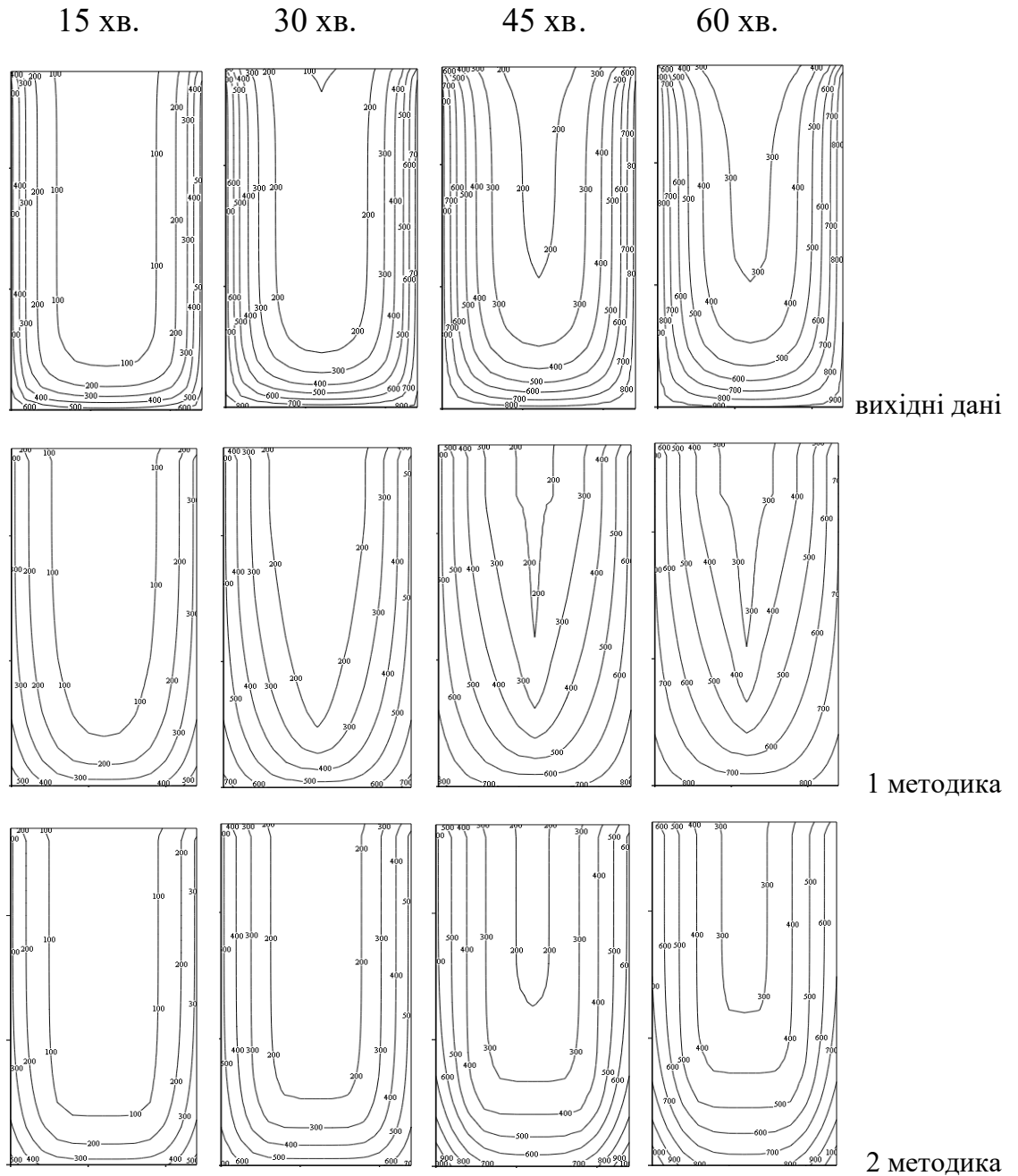


Рисунок 2.29 – Температурні розподіли в перерізі залізобетонного ригеля 300×150 мм із важкого бетону в різні моменти часу дії «стандартної» пожежі, у разі 2 схеми розташування термопар (рис. 2.28 б) за різними методиками

Для більш докладного аналізу точності отриманих результатів використано статистичні критерії, подані в табл. 2.2. Відомості з такого аналізу репрезентовано в табл. 2.3.

Дані порівняльного аналізу результатів інтерполяції за другою схемою розташування термопар, що отримані за різними методиками

Методика інтерполяції	Максимальне відхилення, °С	Середнє відносне відхилення, %	Середньоквадратичне відхилення, °С
1 методика	145	16,8	33,7
2 методика	89	10,3	21,6

Отже, найбільш ефективною в разі використання 2 схеми розташування термопар є 2 методика.

Для остаточного обґрунтування розташування термопар у перерізі ригеля потрібно визначити їхню необхідну кількість. Виконання алгоритму інтерполяції за розробленими методами зумовлює доцільність розміщення певної кількості термопар за лініями їх розташування, відповідно до схеми контрольних точок, що подано на рис. 2.28. Кількість термопар визначають за отриманими залежностями похибки інтерполяції від кількості контрольних точок на лініях розташування термопар. Зазначені залежності визначають через розрахунок похибки, яка відповідає середньому відносному відхиленню всіх вузлових точок перерізу в кожен контрольний момент часу.

На рис. 2.30 представлено результати розрахунків у вигляді графіків.

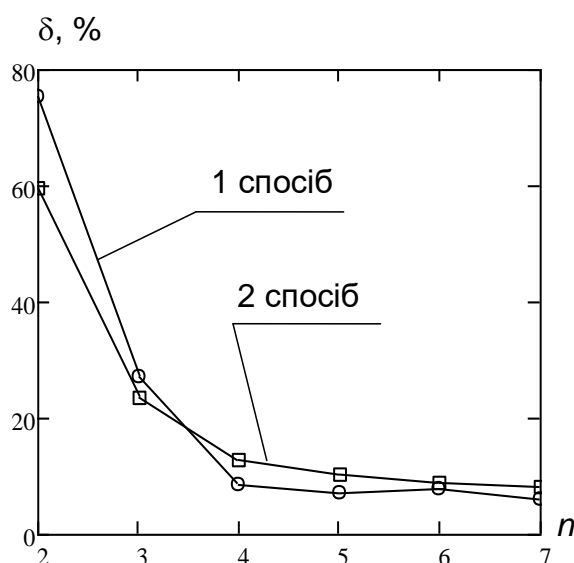


Рисунок 2.30 – Залежності похибки інтерполяції від кількості контрольних точок на контрольній лінії

Згідно з графіками на рис. 2.30, коли кількість точок на контрольній лінії дорівнює чотирьом, похибка починає змінюватися не більше ніж на 1-2 %. За кожного збільшення контрольної точки на одну вздовж контрольної лінії зростає сума на три контрольні точки. Ця обставина відразу збільшує трудомісткість підготовки залізобетонних ригелів до випробування. Необхідно вибрати найбільш вигідне співвідношення між точністю, яка залежить від кількості контрольних точок, і трудомісткістю та вартістю підготовчого процесу до випробувань. З огляду на те, що різниця між похибками (4 контрольні точки вздовж однієї контрольної лінії та 7 точок) становить не більше за 3 %, можна рекомендувати максимальну кількість контрольних точок, що дорівнює чотирьом. Схема розташування термопар має бути увідповіднена з першим варіантом, згідно з рис. 2.28 а, або з другим варіантом (рис. 2.28 б).

Висновки до розділу 2

За результатами досліджень, описаних у розділі 2, виявлено закономірності зміни температурних полів у перерізах елементів залізобетонних будівельних конструкцій в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі. На цій основі обґрунтовано методики встановлення температурних розподілень за результатами точкових вимірювань температури у внутрішніх шарах елементів усіх основних типів несучих залізобетонних будівельних конструкцій за умов теплового впливу пожежі. Визначено місця точкових замірів температури всередині та на поверхні досліджуваних фрагментів. Отримані результати представлено нижче.

Систематизовано два методи апроксимації температурного поля за температурними показниками поверхонь, виміряними за стандартною методикою вогневих випробувань фрагментів з одностороннім обігрівом: стін і плит. Перший метод передбачає розв'язування прямої задачі теплопровідності; другий – заснований на використанні регресійної моделі.

Застосування першого методу є точнішим на 10 %, але не завжди прийнятне, оскільки має більш складну реалізацію. Метод пов'язаний із заданням теплофізичних характеристик матеріалу, що може призвести до наявності мінімуму в розподілі температури. Доведено ефективність застосування запропонованих у Єврокодах методів, зокрема номограмного, що спрощує розрахунок, оскільки не потрібно окремо добирати часовий і просторовий кроки, можна уникнути великих стрибкоподібних змін значень теплоємності й теплопровідності матеріалів. У разі застосування другого методу – регресійної моделі – ефективно використовувати функціонал параболічного типу з масштабованою просторовою координатою. Під час побудови параболічного функціоналу показника ступеня, залежно від товщини елемента, ефективним є застосування експоненціального регресійного функціоналу з трьома параметрами. Перевагу має більш точний метод, оскільки наявні програмні комплекси здатні розв'язувати складні математичні задачі в короткі терміни.

Розроблено обчислювальний алгоритм інтерполяції температури у вузлових точках перерізів залізобетонних балок та колон, відповідно до побудованих ізотермів на вузлових точках головної діагоналі їхніх перерізів. Проаналізовано кілька способів реалізації розрахунків і порівняно результати для кожного виду конструкцій.

Зіставлено результати розрахунків за трьома методами інтерполяції температур, відповідно до даних у дискретних контрольних точках перерізів залізобетонних колон: за апроксимацією ліній, утворених фронтальними перерізами, та твірних поверхні температурного розподілу параболічними залежностями, а також в апроксимації ліній ізотерм афінними кривими, їх побудові в кожній точці дискретизованого перерізу. Систематизовано математичний апарат із метою визначення основних параметрів функціоналів для апроксимації ізотерм у перерізі залізобетонних колон під час експонування за стандартним температурним режимом у вогневій печі. За розрахунку цими методами похибка становить 10,2; 5,8 та 4,4 %, що засвідчує високу точність методів інтерполяції. Найбільш точним визнаний третій метод. Усі розроблені

методи можна використовувати для наближення температурних розподілів за дискретними вимірюваннями температур у контрольних точках, де встановлено термопари.

Проаналізовано методи інтерполяції температур, відповідно до даних у дискретних контрольних точках перерізів залізобетонних балок, що базовані на апроксимації ізотерм у їхніх перерізах за допомогою функціоналів двох типів: еліптичного й параболічного. Систематизовано й узагальнено математичний апарат із метою з'ясування основних параметрів функціоналів для апроксимації ізотерм у перерізі залізобетонних балок, відповідно до замірів температур у контрольних точках, під час їх прогрівання за стандартним температурним режимом пожежі. Доведено високу ефективність обґрунтованого підходу до інтерполяції температурного розподілу в перерізі залізобетонної балки. За першим способом, найбільше значення похибки результатів інтерполяції становить не вище ніж 17 %, за другим – не більше як 11 %. Підсумовано, що другий спосіб інтерполяції температурного розподілу в перерізі залізобетонних балок має більшу ефективність, оскільки за результатами вимірювання температури в контрольних точках його похибка менша за перший спосіб на 6 %.

На основі систематизованих методів інтерполяції температур у перерізах несучих залізобетонних конструкцій забезпечено відтворюваність результатів теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі на досліджувані елементи. Виявлено закономірності зміни температурних полів у їхніх перерізах. Розроблено ефективні схеми розташування термопар усередині та на поверхні зразків, що дають змогу зменшити кількість засобів вимірювальної техніки під час експериментальних досліджень із нагрівання колон і балок до 50 %, порівняно з вимогами нормативних документів.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЕЧІ НА ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ ПІД ЧАС ВОГНЕВИХ ВИПРОБУВАНЬ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

3.1. Обґрунтування вибору програмного комплексу та засобів реалізації досліджень

Вибір конкретного програмного комплексу залежить від особливостей модельованих процесів, можливостей обчислювальної техніки та користувача. Як зазначено в розділі 1, для загального вивчення процесів можливо використовувати спрощені моделі. Проте відтворення складних турбулентних процесів і випромінювання факелів полум'я в закритих об'ємах набагато доцільніше змодельовати. Існують програмні комплекси, в алгоритм роботи яких закладено моделі горіння та тепломасоперенесення. Використання повної системи рівнянь Нав'є – Стокса під час розрахунків дасть змогу оцінити переваги й недоліки конструктивних особливостей камер печей. На основі розрахунків і запланованих технічних характеристик має бути визначено конфігурацію камери печі установки, що буде найбільш точно відтворювати результати експериментів.

Існує кілька критеріїв, що сприяють виконанню такого завдання. Як зазначено в дослідженнях [265–270], під час створення рівномірного прогріву найбільш точно можливо оцінити поведінку залізобетонних конструкцій за температурно-силових навантажень. Крім того, режим нагріву має максимально відповідати стандартному та повинні бути виконані інші вимоги.

Польові моделі, що марковані в наукових зарубіжних джерелах аббревіатурою CFD (computational fluid dynamics – англ. обчислювальна гідродинаміка), є потужним та універсальним інструментом. Переваги таких моделей докладно відображено в працях [265–276].

У роботі [277] проаналізовано математичний апарат та можливості програмного комплексу FDS, які дають змогу створити установки з факельним горінням для моделювання тепломасообміну в камері вогневих печей. Описано алгоритм створення моделі вогневої печі з факельним горінням у зазначеному програмному комплексі. У цьому комплексі обчислювальної газогідродинаміки створено 2 конфігурації, які відрізняються геометричними розмірами та кількістю пальників для проведення обчислювальних експериментів. Перевірено розподіл температур по всій площі печі у створених конфігураціях та проаналізовано отримані результати моделювання тепломасообміну в камерах вогневих печей. Математичний апарат і можливості програмного комплексу FDS допомагають створити установки з факельним горінням для моделювання тепломасообміну в камері вогневих печей.

У праці [277] підсумовано, що використання програмного комплексу FDS має обмеження, зумовлені неможливістю задати температурний режим нагріву камери печі. Можна визначити лише рівномірність прогрівання камери печі й обігрівальної поверхні конструкцій у ній. Цей комплекс, однак, доцільно застосувати для попереднього аналізу. Більш докладне дослідження відібраних конфігурацій можливо провести з використанням порівняно потужнішого інструменту. У працях [57; 278] зауважено, що математичний апарат, закладений у програмний комплекс «FlowVision», має суттєві переваги, порівняно з іншими доступними для використання продуктами. По-перше, базовими в ній є рівняння Нав'є – Стокса, що описують рух рідин і газів у широкому діапазоні чисел Рейнольдса. По-друге, система дає змогу побудувати геометрію об'єкта в спеціалізованих САД-програмах. По-третє, система «FlowVision» уможливорює легке корегування параметрів печі в процесі розрахунків. По-четверте, система «FlowVision» має розвинений апарат візуалізації отриманих результатів.

Отже, попередні розрахунки доцільно провести за допомогою програмного комплексу «FDS», а уточнені – із використанням «FlowVision».

В основу математичного апарату, що застосовують у програмному комплексі «FlowVision», покладено повну систему рівнянь Нав'є – Стокса [57; 87; 278]. Для замикання рівнянь використовують граничні умови 3-го роду.

Рівняння, що описують моделі теплообміну у вогневій печі для випробувань. Для обліку радіаційного теплообміну в газовому середовищі та взаємного теплообміну між середовищем і частками, а також твердим матеріалом доцільно використовувати дифузійну модель випромінювання газу [195; 279].

Для проведення експериментальних досліджень запланованого методу передбачено використання реальної установки з камерою печі. Необхідно визначити можливі варіанти компактних печей, перевірити їхню здатність створювати рівномірний прогрів за стандартним температурним режимом пожежі.

Відповідно до [2], метод випробувань на вогнестійкість за стандартним температурним режимом застосовують за допомогою випробувальних установок, що поєднують вогневу піч і навантажувальний пристрій, із прямою фіксацією межі вогнестійкості за настання граничного стану. Вогневі печі мають відповідати особливим вимогам:

- нагрівальний факел створений на рідкому паливі;
- полум'я факела не торкається поверхонь елементів конструкцій, що нагріваються;
- рівномірно розподілена температура по об'єму нагрівальної камери;
- протягом випробування в об'ємі нагрівальної камери температура змінюється за температурним режимом пожежі, що регламентоване в стандарті [2].

Випробувальне обладнання має забезпечити отримання повторюваних та відтворюваних результатів; конструкція випробувальної печі – створення нормованого теплового впливу на зразок. Таким впливом є стандартизований температурний режим і нормований надлишковий тиск у вогневій камері печі. Внутрішня футерівка печей повинна бути виконана з теплоізоляційного матеріалу, що має густину не більшу як 1000 кг/м^3 . Товщина футерівки не

повинна бути меншою від 50 мм. Футерівку печі виконують із матеріалу, теплова інерція якого за температури 500 С відповідає вказаній вище умові.

Розміри печі мають уможливлювати випробування зразків, розміри яких регламентовані стандартами [1–2; 31–34]. Так, піч для випробування вертикальних огорожувальних конструкцій повинна мати проріз у передній стінці печі розмірами не менше ніж 3000 мм × 3000 мм і глибину простору вогневої камери не менше від 0,8 м. Для горизонтальних конструкцій вимоги не настільки суворі [277].

Глибина простору камери печі аргументована тим, що випромінювання факелу полум'я пожежі впливає на результати досліджень, тому його дію необхідно мінімізувати. Крім того, допустиме випробування фрагментів конструкцій, якщо реально випробувати неможливо. Це апріорі доводить недосконалість проведення лише експериментальних досліджень та неуніверсальність наявних методів.

Отже, принцип створення компактних печей має бути базований на мінімальній відстані до факелу полум'я та універсальності печі.

3.2. Аналітичне дослідження тепломасообміну в камері печі для визначення теплового впливу пожежі на будівельні конструкції

Для дослідження нагрівання всередині камер під час вогневих випробувань (відповідно до принципів, зазначених у п. 3.1, вимог нормативних документів [1–2; 4; 31–34], наукових праць [40–53]) ухвалено рішення створити 10 конфігурацій внутрішнього простору печі, що можуть бути змодельовані згідно з програмним комплектом «Fire Dynamics Simulator».

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

Геометричні конфігурації печей і габаритні розміри камер зазначено в табл. 3.1. На рисунку 3.1. представлено загальний концепт геометричних конфігурацій вогневих печей, що створені в програмному комплексі «FDS».

Таблиця 3.1

Габаритні розміри установок для випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій

Назва печі	Розміри вогневої камери, мм			Кількість пальників у печі (n)	Кількість отворів для виходу продуктів горіння (d)
	ширина (a)	висота (b)	глибина (c)		
Конфігурації 1	1000	1000	1000	2	1
Конфігурації 2	1200	1000	1200	2	1
Конфігурації 3	1000	1000	1000	4	1
Конфігурації 4	1000	1000	1000	4	2
Конфігурації 5	1000	1000	1000	3	1
Конфігурації 6	1000	1000	1000	3	2
Конфігурації 7	1100	1200	1000	2	1
Конфігурації 8	1200	1200	1200	2	1
Конфігурації 9	1100	1100	1100	2	2
Конфігурації 10	1100	1100	1100	2	1

На рисунку 3.1. представлено загальний концепт геометричних конфігурацій вогневих печей, що створені в програмному комплексі «FDS».

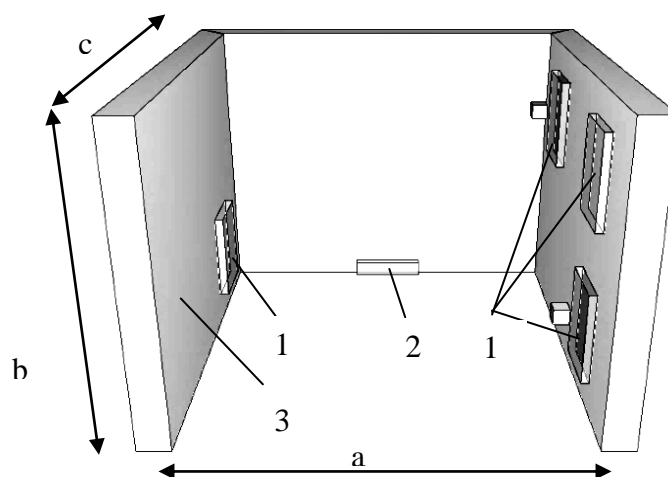


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд конфігурацій вогневих печей: 1 – пальники та отвори для входу повітря, 2 – місця розташування отворів(у) для виходу продуктів горіння, 3 – П-подібне огороження камери печі

Отже, створено 10 конфігурацій печей для перевірки рівномірності прогріву камери печі, вихідних умов, необхідного палива та вибору найбільш релевантної моделі реального прототипу.

Наступний етап – створення сіткових моделей печей та вибір розміру розрахункових комірок. Для розроблення моделей вогневих печей за стандартними розмірами необхідно створити сітку, зазначити її границі (довжину, ширину, висоту), кількість комірок по x , y , та z . Кількість комірок визначає оператор.

Чисельне інтегрування рівнянь за просторовими координатами проводять із використанням прямокутної, адаптивної, локально подрібненої сітки. Такий підхід уможлиблює, з одного боку, використання простої рівномірної неадаптивної сітки під час виконання завдань із порівняно нескладною геометрією.

Зафіксовано прямо пропорційну залежність між точністю розрахунку та чисельністю розрахункових комірок. Водночас виявлено обернено пропорційну залежність між кількістю комірок і часом, протягом якого відбуватиметься розрахунок.

Основні принципи побудови математичної моделі, створення сіткової моделі печі представлено на рис. 3.2.

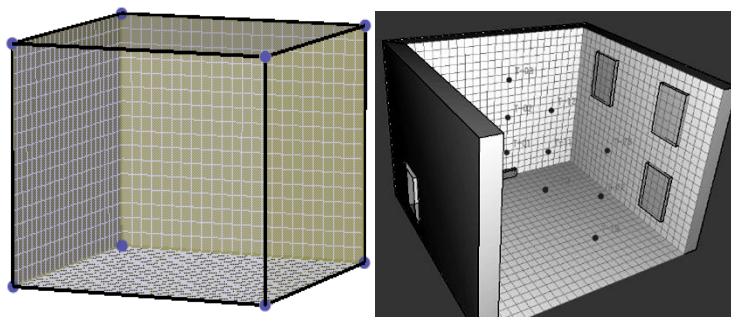


Рисунок 3.2 – Сіткові моделі розрахункової ділянки конфігурацій вогневих печей: місця розміщення точок контролю температури всередині камери печі

Відповідно до габаритів вогневих печей, вибрано дев'ять місць контролю температури в камерах печей, що представлено на рис. 3.2. За допомогою програмного

забезпечення «FDS» додатково були створені площини, які зможуть графічно представити зміну розподіл температур.

Цей програмний комплекс дає змогу працювати як у у текстовому режимі та виводити результати за допомогою додаткових плагінів. На рис. 3.3 зображено загальний вигляд створених площин у моделях.

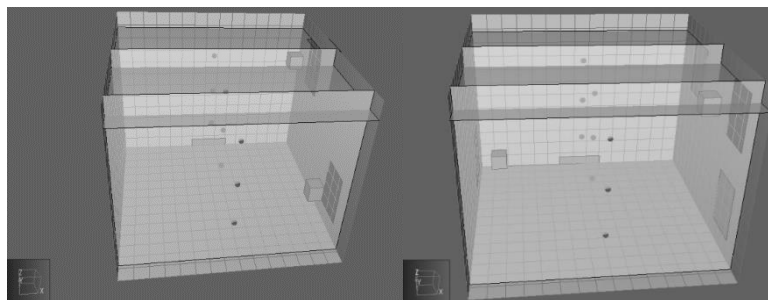


Рисунок 3.3 – Розташування температурних площин у моделях конфігурацій вогневих печей

Вибраний програмний комплекс дає змогу зазначити час початку розрахунку та його тривалість. Проте відсутня можливість коригування подання палива (зміни температури всередині) у процесі розрахунку. Для оцінювання якості роботи конфігурації достатньо 3600 секунд горіння всередині камери. Тривалість розрахунку становить від 12 до 24 години.

Розроблено алгоритм проведення обчислювального експерименту з використанням створених комп'ютерних моделей камер печей та дотримано послідовності розрахункових процедур, що описана нижче.

1. За допомогою «CAD»-програми або вбудованого графічного редактора створено геометричну конфігурацію печі установки. Усередині створено місця подання палива та отвору для вільного входу / виходу повітря і продуктів горіння.

2. Уведено початкові параметри моделювання, які неможливо змінити в процесі розрахунку: початкова температура середовища, необхідний час пожежі, газ, використовуваний як пальне, тиск навколишнього середовища.

3. Ініційовано процес горіння (рис. 3.4).

4. У ході розрахунку передбачено спостереження за градієнтом і температурою точок у камері в онлайн-режимі.

На наступному етапі роботи проаналізовано розподіл температур по поверхні конструкції на 60 хвилині випробувань [20]. Для унаочнення на рис. 3.4 зображено розподіл температур по площині в раніше вказаних місцях розташування (див. рис. 3.3), біля поверхонь конструкцій вогневої печі, фрагменту несучої стіни, біля форсунок та виходів продуктів горіння в конфігураціях «1» та «10» на 10 і 60 хвилині випробувань.

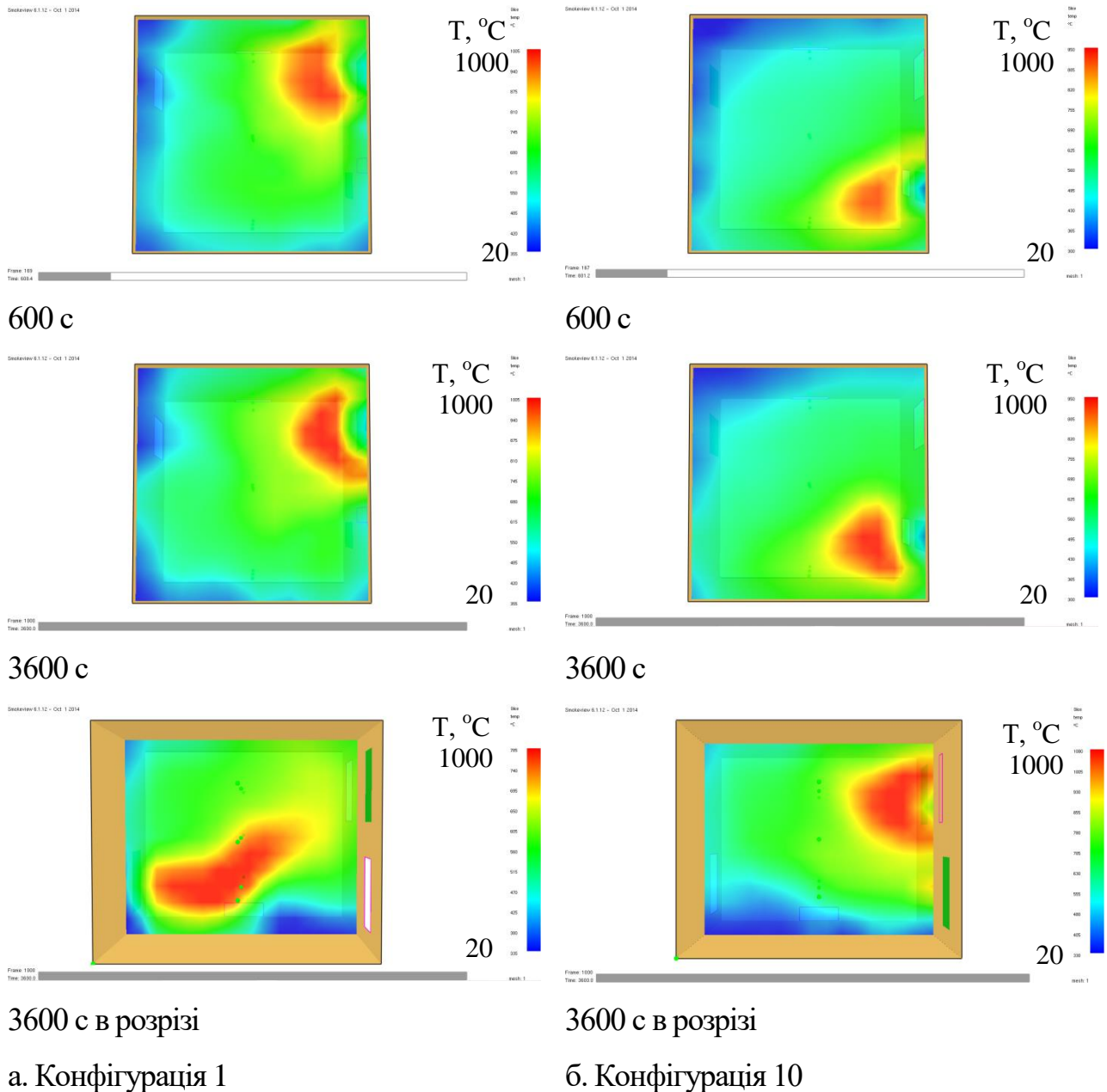


Рисунок 3.4 – Площини температурного розподілу в змодельованих вогневих печах

Після отримання результатів розрахунків проаналізовано можливість забезпечення стандартного температурного режиму пожежі в камерах печей, а також з'ясовано основні недоліки камер роботи конфігурацій. Відомості узагальнено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Габаритні розміри установок для випробувань вогнестійкості будівельних конструкцій

Назва печі	Основні недоліки	Суб'єктивне оцінювання
Конфігурація 1	Швидке прогрівання камери печі. Необхідне контрольоване прогрівання. Рівномірність прогріву відбувається лише в протилежній до факелів площині. Під час роботи установки необхідно змінювати місця розташування пальників, залежно від виду досліджуваної будівельної конструкції.	Добре
Конфігурація 2	Нерівномірний прогрів по горизонтальному напрямку, що може виникати внаслідок некубічної форми камери печі.	Задовільно
Конфігурація 3	Нерівномірність прогріву в усіх площинах, що виникає через випромінювання факелів. Недоцільне використання 4 пальників у камерах малого об'єму.	Незадовільно
Конфігурація 4	Більш рівномірне прогрівання, порівняно з конфігурацією 3, через відтік газів крізь додатковий отвір. Нерівномірність прогріву камери, що зумовлене 4 пальниками.	Незадовільно
Конфігурація 5	Нерівномірність прогріву в усіх площинах, окрім центральної. Недоцільно використання 3-х пальників у камерах малого об'єму.	Незадовільно
Конфігурація 6		
Конфігурація 7	Нерівномірність розподілу температури всередині камери печі, що зумовлене різними габаритними розмірами площин, які прогріваються.	Незадовільно
Конфігурація 8	Порівняно плавне та рівномірне прогрівання. Збільшена порівняно з конфігурацією 1 витрата палива.	Добре
Конфігурація 9	Порівняно плавне та рівномірне прогрівання. Збільшена порівняно з конфігураціями 1 та 8 витрата палива через відтік тепла крізь додатковий отвір.	Задовільно
Конфігурація 10	Порівняно плавне та рівномірне прогрівання. Збільшена порівняно з конфігурацією 1 витрата палива.	Добре

Аналіз табл. 3.2 спонукає до висновку, що найдоцільніше дослідити процес нагрівання за стандартним температурним режимом пожежі камер печей у конфігураціях 1, 8 та 10. Максимальна температура в обох конфігураціях була досягнута вже на 3 хвилині, що становило в конфігурації 1 – 810 °С, у конфігурації 8 – 800 °С, а в конфігурації 10 – 790 °С у верхній частині печей, 800 °С, 780 і 770 °С – у нижній частині. Абсолютне відхилення температури в горизонтальних площинах не перевищило 30 °С. Проте температурний режим, що виникає в печі, не відповідає стандартному [2].

Згідно з обчислювальними експериментами щодо моделювання тепломасообміну, у камері вогневих печей відбувається рівномірний розподіл температур по всій площі печі. Максимальної температури в конфігураціях досягнуто значно швидше, ніж передбачає стандарт [2]. Розбіжність температур у різних площинах не перевищувала 30 °С.

На підставі аналізу отриманих результатів можна говорити про наявність недоліків. Особливістю програмного комплексу є те, що в процесі розрахунку неможливо коригувати інтенсивність горіння факелів полум'я. Дані закладають у препроцесор, задають час розрахунку, далі «FDS» працює автономно, що не дає змоги відтворити стандартний температурний режим у камері печі. Відбувається інтенсивне прогрівання камери печі. Уже через 1 хвилину досягають стаціонарної температури, яка тримається протягом розрахунку.

Використання програмного комплексу «FDS» має обмеження, що були передбачені в ході дослідження. З огляду на це існує необхідність у застосуванні більш потужного розрахункового інструменту. Під час моделювання з'ясовано, які фактори найсуттєвіше впливають на розподіл температур у камері, а також визначено її форму та місця розташування пальників.

Форма камери печі, що здатна забезпечувати відтворюваність результатів, а також універсальність установки, є кубічною, проте об'єм може варіюватися. Достатньо використання одночасно двох пальників, проте повинна існувати можливість зміни місця їхнього розташування, залежно від виду фрагменту досліджуваної залізобетонної конструкції. Необхідно встановити мінімально можливу відстань від зразка до пальників. Отвір для виходу продуктів горіння варто встановлювати на задній стінці печі. Це

вможливить зміну його розмірів, але необхідно визначити висоту, на якій має бути розташований отвір.

За результатами моделювання виявлено три найвагомійші фактори. Вплив кожного з них на рівномірність прогріву, а також на варіацію, що забезпечить найменшу дисперсію температур по обігрівальній поверхні, можливо визначити за допомогою повного факторного експерименту.

Отже, наступний етап досліджень передбачає створення восьми моделей печей у розрахунковому комплексі «FlowVision», а також подальше вивчення розподілів температур за наявності елементів будівельних конструкцій усередині.

3.3. Варіація факторів для оцінювання рівномірності прогріву камери печі

Описані в параграфі 3.2 результати досліджень слугують основою для такої гіпотези: дисперсія температур по обігрівальній поверхні фрагментів залізобетонних конструкцій має лінійну залежність від найбільш значущих параметрів. Найбільш значущі параметри в цьому випадку: об'єм камери V (м³), відстань до пальників l (м), а також висота розташування отвору для відведення продуктів горіння h (м). З огляду на сформульовану гіпотезу лінійної залежності, її математична модель може бути побудована на основі регресії [113; 114]:

$$S^2 = p_0 + p_1x_1 + p_2x_2 + p_3x_3 + p_4x_1x_2 + p_5x_1x_3 + p_6x_2x_3 + p_7x_1x_2x_3 \quad (3.1),$$

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

Коефіцієнти регресії (3.1) обчислюють на основі 8 числових експериментів. Числові експерименти проводять за простим ортогональним планом, відповідно до матриці плану, поданої нижче у вигляді табл. 3.3 [113; 114].

Таблиця 3.3

Матриця планування обчислювального експерименту

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

У табл. 3.4 подано окреслені межі діапазонів, у яких змінюються зазначені фактори під час обчислювального повного факторного експерименту для побудови математичної моделі залежності дисперсії температур від описаних вище параметрів.

Таблиця 3.4

Інтервали варіювання факторів у обчислювальному експерименті

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

На основі діапазонів варіювання факторів, що подані в табл. 3.4, із використанням матриці плану повного факторного експерименту за табл. 3.3,

були виконані необхідні обчислення й отримані значення дисперсії температур по обігрівальній поверхні досліджуваних фрагментів залізобетонних будівельних конструкцій. Результати обчислень представлено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5

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

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

На основі числових величин табл. 3.4 обчислено коефіцієнти регресії (3.1). Застосовано вирази для їх визначення, що подано нижче [113; 114]:

$$p_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S^2; p_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 S^2; p_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 S^2; \\ p_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_3 S^2; p_4 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 S^2; \quad (3.2)$$

$$p_5 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_3 S^2; p_6 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 x_3 S^2; p_7 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 x_3 S^2,$$

де $N = 8$ – кількість проведених обчислювальних експериментів відповідно до плану; x_i – значення фактору відповідно до матриці плану (див. табл. 3.3); S^2 – значення дисперсії температур по обігрівальній поверхні фрагментів залізобетонних будівельних конструкцій згідно з табл. 3.4.

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

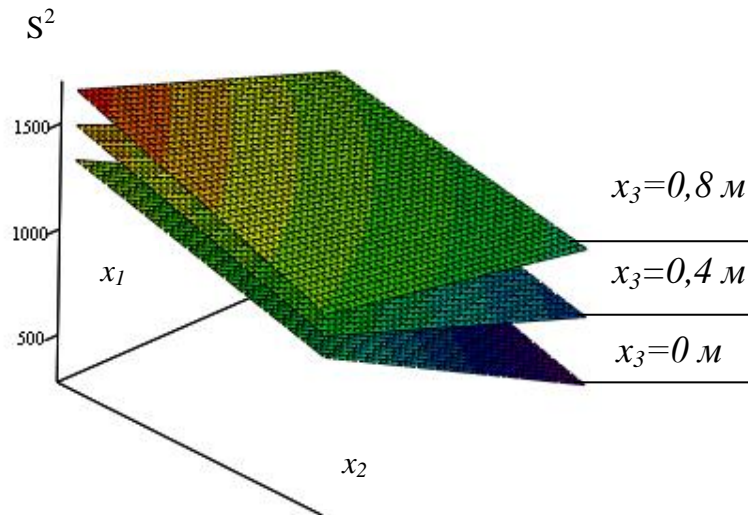


Рисунок 3.5 – Дисперсія температур у камері вогневої печі за постійного місця розташування отвору для відведення продуктів горіння (фактор 3) та варіації інших факторів

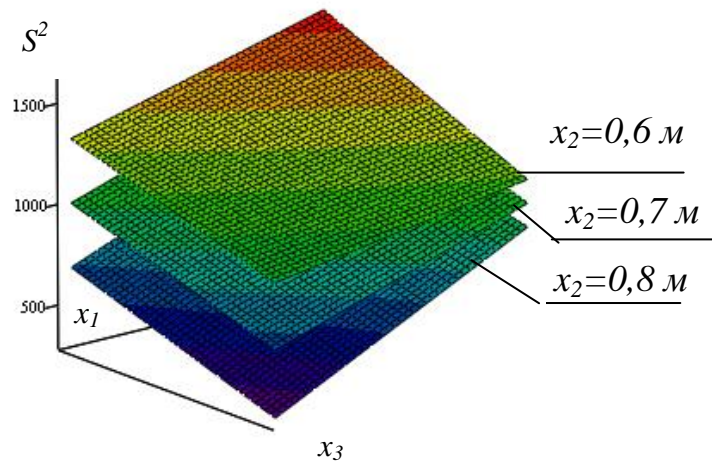


Рисунок 3.6 – Дисперсія температур у камері вогневої печі за незмінної відстані до пальників (фактор 2) та варіації інших факторів

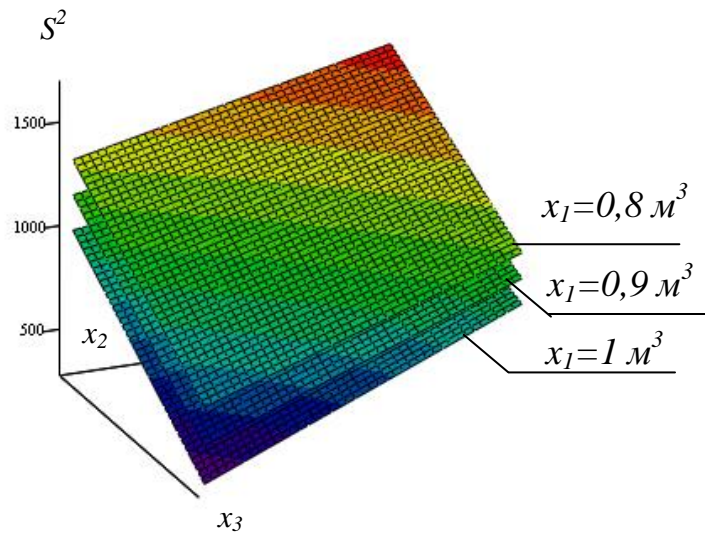


Рисунок 3.7 – Дисперсія температур у камері вогневої печі за незмінного об'єму (фактор 1) та варіації інших факторів

Результати обчислень із визначення коефіцієнтів регресії подано нижче в табл. 3.6.

Таблиця 3.6

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

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

Виявлено закономірність залежності вогнестійкості від найбільш значущих параметрів: об'єм камери (V), відстань від пальників до поверхні досліджуваного фрагменту несучої залізобетонної будівельної конструкції (l), висота, на якій розташований отвір для виходу продуктів горіння (h) у вигляді:

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

(3.3).

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

3.4. Уточнені дослідження якості прогрівання камер печей

Проведені розрахунки доводять необхідність більш досконалого вивчення роботи запроєктованих моделей камер вогневих печей установки для створення ескізу реального прототипу. Перевагу надано системі «CFD FlowVision 2.5». Сутність обчислювального експерименту полягає в ініціації процесу горіння з контролем температури всередині моделі термопар так, щоб температурний режим їхнього нагріву якомога точно збігався з температурною стандартною кривою пожежі [2; 57].

На основі математичного моделювання необхідно досягти впливу теплообміну між термопарою і камерою печі, а також з'ясувати, який вплив на результати має неоднорідний розподіл температур у камері печі та на поверхні досліджуваного елемента. Математичне моделювання дає змогу виокремити технологічні параметри печі, підвищити точність випробувань.

Базовими у «FlowVision» є рівняння Нав'є – Стокса (разом із рівнянням нерозривності). Для замикання цих рівнянь, залежно від конкретного завдання, використовують додаткові співвідношення, що описують зміну густини, турбулентне перенесення та ін. Набори цих співвідношень у сукупності з рівняннями Нав'є – Стокса називають моделями. У «FlowVision» найбільш повно представлені такі моделі [279]:

– наближення Буссінеска (малі зміни густини) для опису ламінарної течії в'язкої рідини за малих чисел Рейнольдса;

– k-ε модель турбулентної течії в'язкої рідини з невеликими змінами густини за великих чисел Рейнольдса;

– модель слабо стисливої рідини (у термінології «FlowVision»), що дає змогу розраховувати стаціонарний дозвуковий рух газу за будь-яких змін густини;

– модель повністю стисливої рідини (у термінології «FlowVision»): стаціонарний і нестаціонарний рух за будь-яких чисел Маха (до-, транс-, над- і гіперзвукові течії).

Як інструмент для побудови геометрії моделей використано демоверсію програмного комплексу «SolidWorks». Розміри моделей відповідають реальним розмірам вогневих печей.

«FlowVision» допускає також використання моделі теплоперенесення у твердому тілі, що поєднане з перенесенням тепла й речовини в рідині (газі). Крім того, у «FlowVision» передбачено кілька спеціальних моделей (безпосередньо не пов'язаних із рівняннями Нав'є – Стокса), із яких до базової навчальної версії пакету входять тільки моделі вільної поверхні, двофазного потоку й одна з моделей горіння.

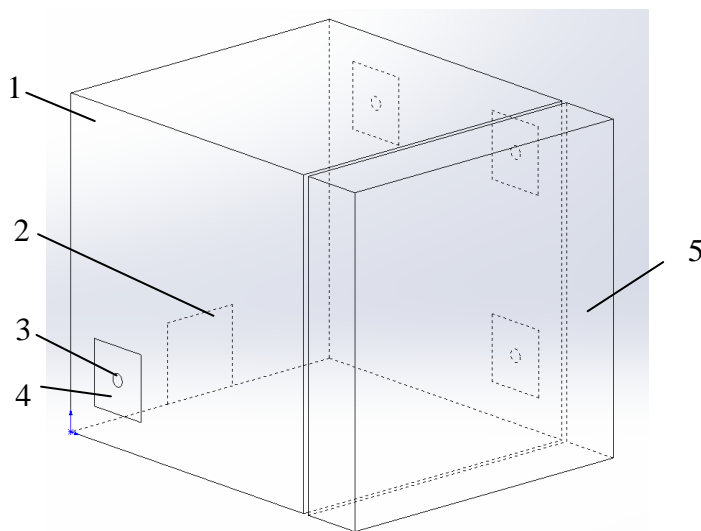


Рисунок 3.8 – Загальний вигляд геометричної конфігурації камери вогневої печі: 1 – огороження печі; 2 – отвір для виходу продуктів горіння; 3 – вхід газово-повітряної суміші; 4 – отвір для вільного надходження повітря; 5 – фрагмент елемента залізобетонної конструкції

Габаритні розміри CAD-моделей конфігурацій камер
вогневих печей (рис. 3.8).

Назва конфігурації	a, мм	b, мм	c, мм	x, мм	y, мм	z, мм	n, мм	d, мм	l, мм
Модель 1	1000	1000	1000	200	250	375	125	68	200
Модель 2	1100	1100	1100	200	250	425	125	68	250
Модель 3	1200	1200	1200	200	250	475	125	68	300

Після створення CAD-моделей їх імпортовано до середовища програмного комплексу «FlowVision».

Основні принципи побудови комп'ютерної моделі:

- 1) як основний інструмент для побудови моделі та реалізації обчислювального експерименту використано програмний комплекс «FlowVision 2.5»;
- 2) у процесі обчислювального експерименту взято до уваги конвективний і радіаційний теплообмін поверхні досліджуваних конструкцій та простору камери печі;
- 3) у камерах передбачені місця заміру температури для контролю відповідності режиму «стандартній» кривій пожежі, з огляду на конвективний і радіаційний теплообмін;

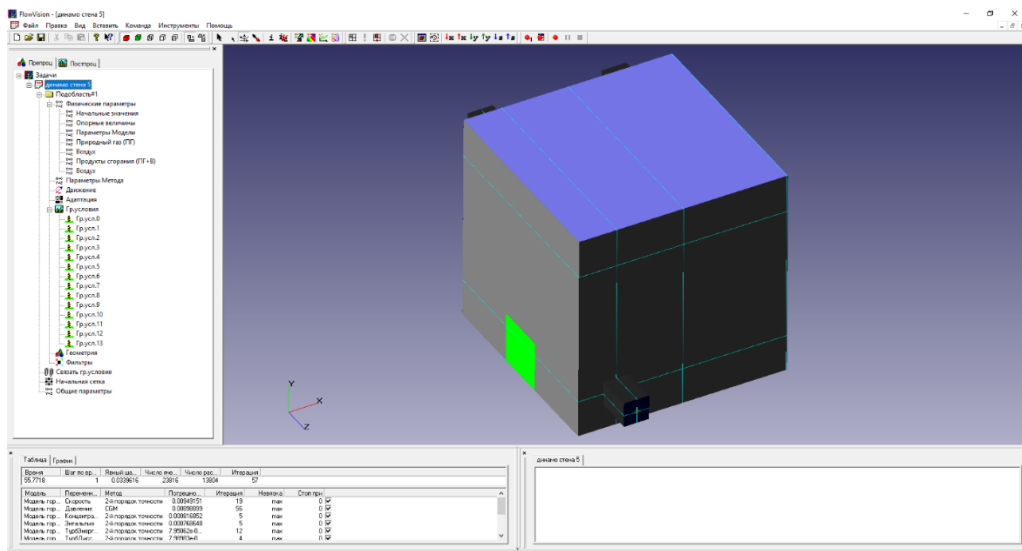


Рисунок 3.9 – Інтерфейс обраного програмного комплексу

Як і більшість прикладного програмного забезпечення для обчислювального моделювання, пакет «FlowVision» формально поділений на 3 модулі: препроцесор, солвер і постпроцесор.

Препроцесор виконує такі основні функції:

- побудова геометричної основи завдання – розрахункової ділянки, що формують за допомогою зовнішніх програм (так званих геометричних препроцесорів) і потім імпортують до «FlowVision»; варто зауважити, що «FlowVision» працює тільки з тривимірною геометрією, тому двовимірні моделі необхідно характеризувати як окремий випадок тривимірних;

- фізико-математичне формулювання завдання: вибір моделі для внутрішніх точок розрахункової ділянки (завдання конкретного виду рівнянь, значень коефіцієнтів), а також завдання на межах розрахункової ділянки граничних умов, а для нестационарних задач – початкових умов;

- уведення параметрів розрахункової сітки й методу для обчислювального розв'язання задачі.

Солвер уможливорює обчислювальний розв'язок окресленої задачі. Постпроцесор слугує для виведення та графічного представлення, насамперед для візуалізації даних, отриманих унаслідок розрахунків. У «FlowVision» використовують великий набір методів візуалізації, що класифікують за типом математичних величин: скалярна величина, скалярне поле, векторне поле (швидкості). Важливо, що дані можуть бути виведені на будь-якому етапі розрахунку, це дає змогу простежувати динаміку модельованого процесу.

У «FlowVision» допускають використання широкого набору граничних умов, що залежать від конкретної моделі, однак усі вони базовані на таких найбільш уживаних умовах гідродинаміки:

- умови прилипання або прослизання рідини, що задані для вектору швидкості на межах із твердими тілами;

- умови на значення тиску, зазвичай задані на межах;

- умови на значення швидкості потоку по нормалі до кордону або під кутом до нормалі;
- умова витікання з нульовим градієнтом тиску (вільний вихід);
- комбінації описаних умов, наприклад, вільне витікання рідини з нульовими градієнтами тиску та швидкості або задані на межах значення тиску і швидкості.

Для обчислювального розв'язання базових рівнянь у «FlowVision» використовують метод, заснований на консервативних схемах розрахунку нестационарних рівнянь у часткових похідних, які порівняно з неконсервативними схемами вможливають рішення, що точно задовольняють закони збереження (зокрема рівняння нерозривності). За бажанням користувача для розв'язання записаної системи лінійних алгебраїчних рівнянь може бути використаний як неявний (більш надійний), так і явний (швидше працює, але відрізняється за умови великих кроків за часом) варіант ітераційного процесу. Метод базований на ейлеревому підході до опису руху рідини, сутність якого полягає в тому, що різні скалярні й векторні величини постають, як функції змінних Ейлера часу та координат точки в нерухомій системі координат [74–81].

Після введення параметрів математичної моделі фіксують загальні показники: вісь гравітації, критерій Куранта – Фридрихса – Леві (табл. 3.10) [279] тощо.

Наступний етап полягав у створенні сіткової моделі печі. Аналогічно до моделей, створених у «FDS» та описаних у 2 розділі, у «FlowVision» констатовано прямо пропорційну залежність між точністю розрахунку й кількістю розрахункових комірок; між кількістю комірок і часом – обернено пропорційну залежність. Необхідно балансувати між точністю розрахунку та часом, що потрібний для цього.

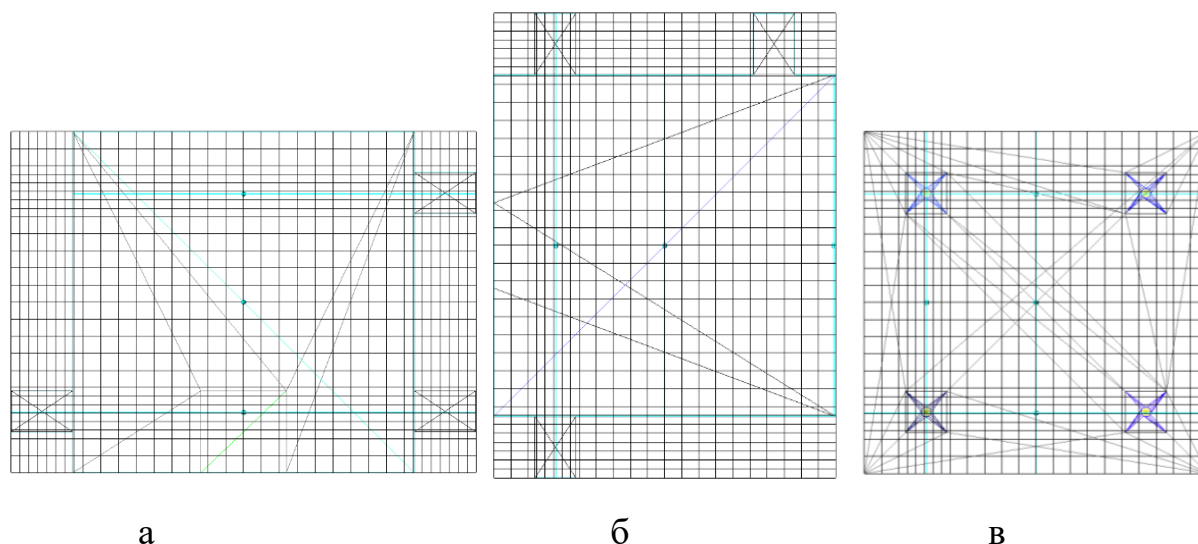


Рисунок 3.10 – Сіткова модель простору камери випробувальної печі: а – вид по осі X; б – вид по осі Z; в – вид по осі Y.

Наступний етап – це вибір місця контролю температури в камері. Таких місць має бути не менше як 5 за 100 мм від прогнозованого положення будівельної конструкції. Місця контролю температури вибрані за такими принципами:

- у місцях розміщення термопар у реальних установках для дотримання стандартного температурного режиму пожежі [2], аналогічно до того, як це відбувається в реальних установках;
- у місцях над пальниками камери печі, на відстані 100 мм від залізобетонної плити;
- у камері горизонтальної печі додатково контролювана температура між пальниками на відстані 100 мм від прогнозованого розміщення конструкцій, для коректного дотримання стандартного температурного режиму [2] та подальшого аналізу розподілу температур у камері печі.

Після вибору місць для контролю температури засобами комп'ютерної програми були створені площини, у яких візуально, за допомогою кольорів, відображені температурні потоки в камері печі. Крім того, задано умови для запису анімаційного фільму про процес горіння.

На рис. 3.11 засобами розрахункового комплексу показано температурні розподілення під час моделювання тепломасообміну в камері печі. Відображено змодельовану роботу двох нижніх пальників, як під час випробування горизонтальних конструкцій.

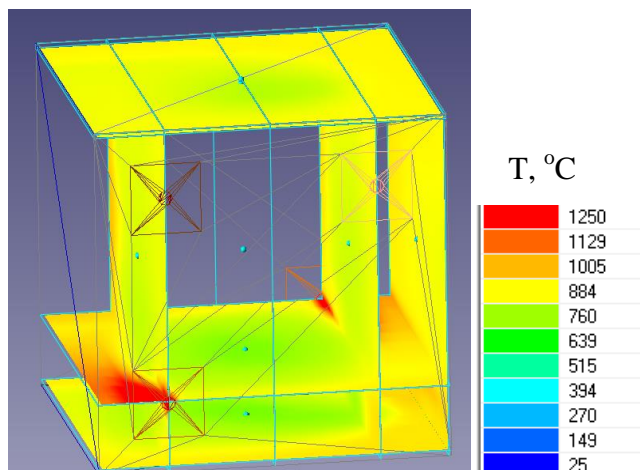


Рисунок 3.11 – Візуалізація процесу горіння засобами програмного комплексу «FlowVision 2.5»

Сутність обчислювального експерименту полягає в ініціації процесу горіння з контролем температури всередині камери змодельованої печі так, щоб температурний режим нагріву якомога точно збігався з температурною стандартною кривою пожежі. Для цього засобами контролю системи «FlowVision» в інтерактивному режимі зафіксовано поточні дані з місць контролю температури, що описані вище. У разі досягнення максимальної температури для певного кроку за часом параметри процесу горіння змінюються. Потім процедура зміни параметрів процесу горіння повторюється для наступного часового інтервалу.

3.5. Результати моделювання процесу нагрівання у вибраних конфігураціях

Під час обчислювального експерименту контроль температури організований так, щоб середня температура в камері змодельованих печей якомога точно збігалася з температурною стандартною кривою пожежі й не

виходила за допустимі межі випробування [2]. Для цього засобами контролю системи «FlowVision 2.5» в інтерактивному режимі зафіксовано поточні дані з термопар. У разі досягнення максимальної температури для певного кроку за часом параметри процесу горіння змінювалися. Дані щодо температури в місцях, зображених на рис. 3.12, зафіксовано щосекунди для досягнення необхідної точності в ході побудови графіків.

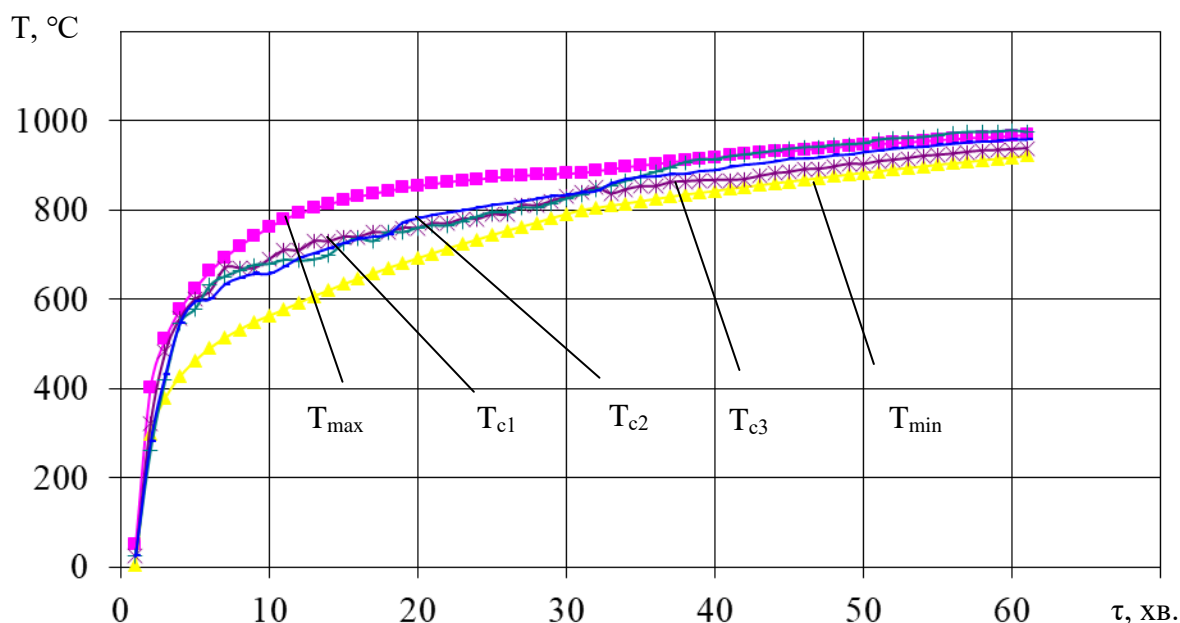


Рисунок 3.12 – Графік зміни температури всередині змодельованої термопарі в камерах печей (табл. 3.3): T_{c1} – середня температура в камері печі по всіх місцях контролю в моделі 1; T_{c2} – середня температура в камері печі по всіх місцях контролю в моделі 2; T_{c3} – середня температура в камері печі по всіх місцях контролю в моделі 3; T_{max} , T_{min} –максимально та мінімально допустимі температури при випробуваннях на вогнестійкості за стандартним температурним режимом пожежі [2].

Температура відповідно до «стандартної кривої пожежі» [2] на 60 хвилині $T_{кп}$ дорівнює 945 °С. При цьому температурні межі випробування такі: від 922 °С до 960 °С. Середня температура в камерах змодельованих камер вогневих печей перебуває в обов'язкових межах (рис. 3.12).

На рис. 3.13 – 3.15 представлено візуальні результати розрахунків у камері печі під час випробування горизонтальних конструкцій.

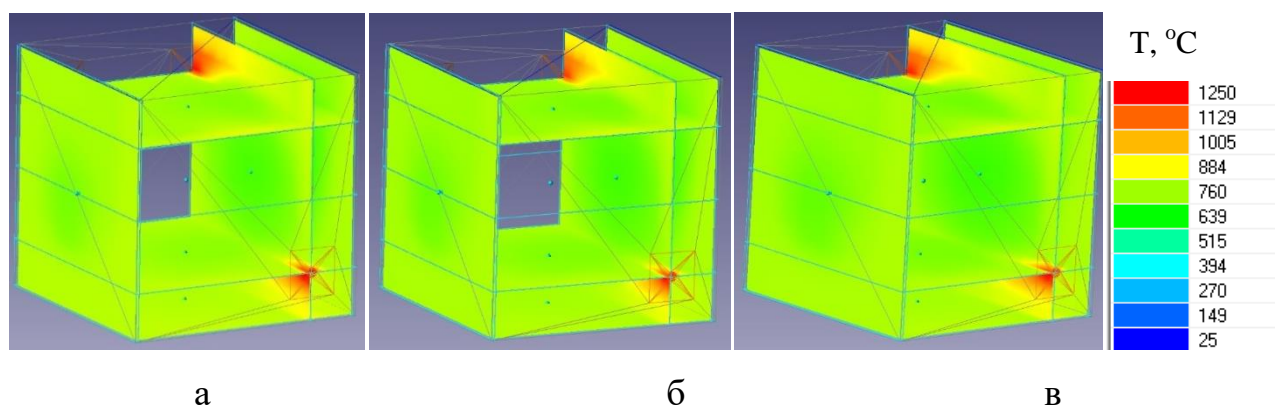


Рисунок 3.13 – Градієнт температур у камерах печей на 10-й хвилині випробувань:

а – модель 1, б – модель 1, в – модель 1

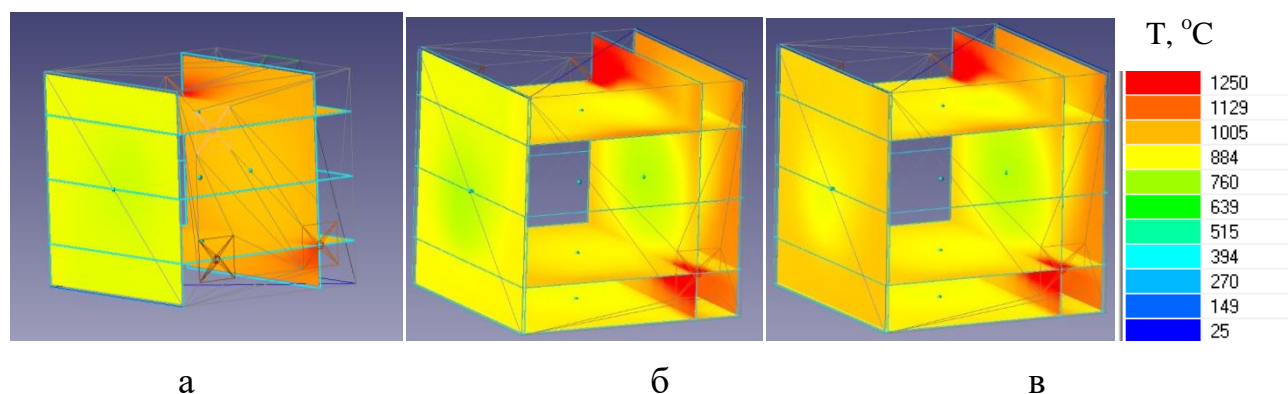


Рисунок 3.14 – Градієнт температур у камерах печей на 30-й хвилині випробувань:

а – модель 1, б – модель 1, в – модель 1

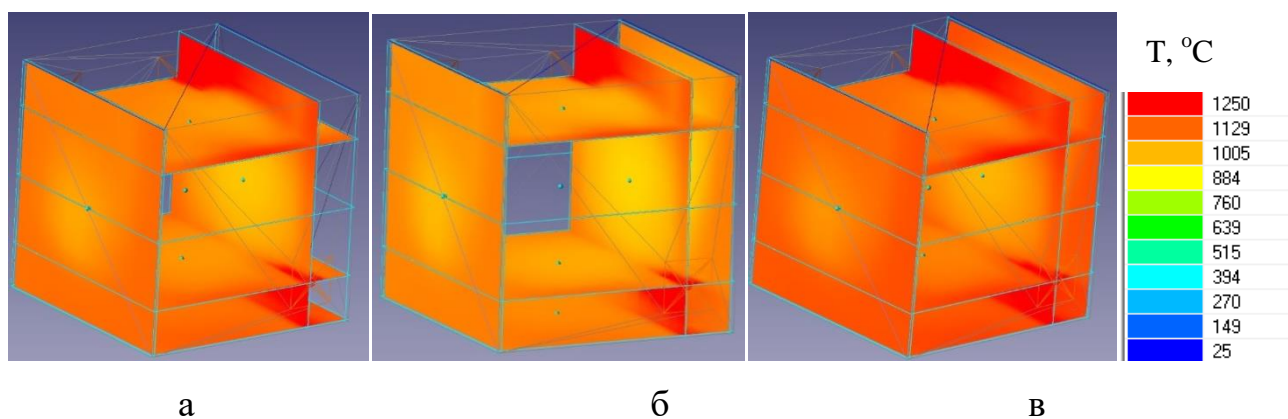


Рисунок 3.15 – Градієнт температур у камерах печей на 60-й хвилині випробувань:

а – модель 1, б – модель 1, в – модель 1

Як видно з рисунків 3.13 – 3.15, у камерах печей найбільш рівномірний розподіл температури по камері печі. Більший градієнт зафіксований у площині пальників, найменший – на обігрівальній поверхні передбаченого місця розміщення досліджуваних конструкцій.

Аналіз уточнених розрахунків спонукає до висновку про те, що всі три установки забезпечують рівномірність прогріву. Камери відрізняються об'ємом і схемами розміщення нагрівального обладнання. Це потенційно призведе до того, що випробувальні установки вможливлуватимуть прийнятні результати. У такому разі можна гарантувати відтворюваність результатів. Проте модель 1 має менший об'єм, отже, потребує менше палива, є більш економічною та екологічною, ніж інші моделі.

Необхідно провести моделювання, що передбачатиме наявність основних елементів будівельних конструкцій у камері, і дослідити розподіл температур на їхніх поверхнях у моделі 1.

3.6. Результати моделювання процесу нагрівання поверхонь основних елементів залізобетонних будівельних конструкцій

Аналіз конструкції та роботи печей для випробувань будівельних конструкцій засвідчив факт недосконалості метрологічного забезпечення та методів управління паливно-форсунковою системою [278]. У попередньому розділі досліджено низку конструкцій камер вогневих печей і зроблено висновок щодо найбільш релевантної конфігурації. На рис. 3.16 зображено внутрішні розміри основних елементів камери, запропонованої для дослідження моделі.

Для досліджень передбачено використання описаних на рис. 3.6 конструкцій установок та вивчення досвіду проєктування подібних пристроїв [87; 278], з огляду на основні вимоги [1–2; 31–34]. Після розроблення загального вигляду геометричної конфігурації моделі вогневої печі заплановано

обчислювальний експеримент для перевірки коректної роботи конструкції установки за наявності встановлених будівельних конструкцій.

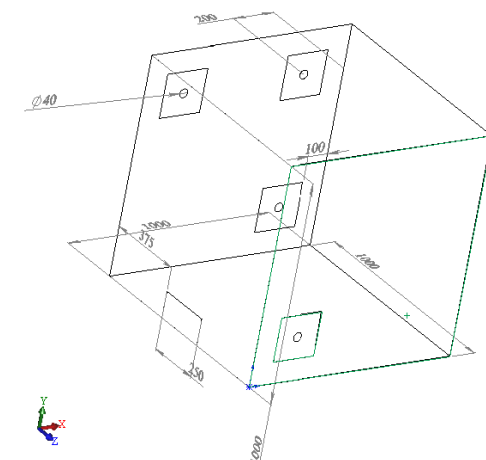


Рисунок 3.16 – Внутрішні розміри камери моделі вогневої печі без встановлених елементів будівельних конструкцій

На рисунку 3.14 представлено геометричні конфігурації вогневих печей зі встановленими в них конструкціями.

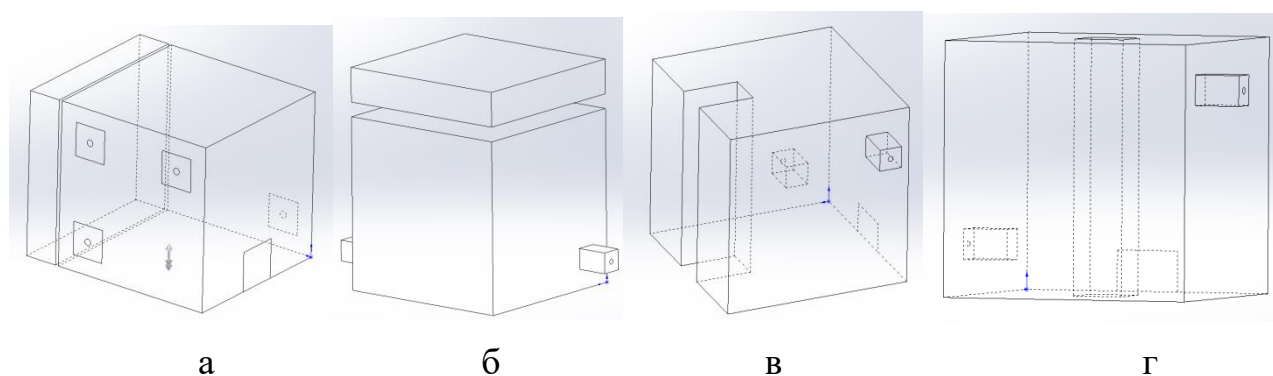


Рисунок 3.17 – Геометричні моделі камер вогневих печей зі встановленими фрагментами будівельних конструкцій

Як зображено на рис. 3.17, для основних елементів залізобетонних будівельних конструкцій (стіни, плити, балки та колони) були створені окремі САD-моделі. Передбачено проведення чотирьох окремих обчислювальних експериментів для дослідження температурного розподілу по поверхні зазначених конструкцій. На рис. 3.17 а) проілюстровано місця можливого розміщення

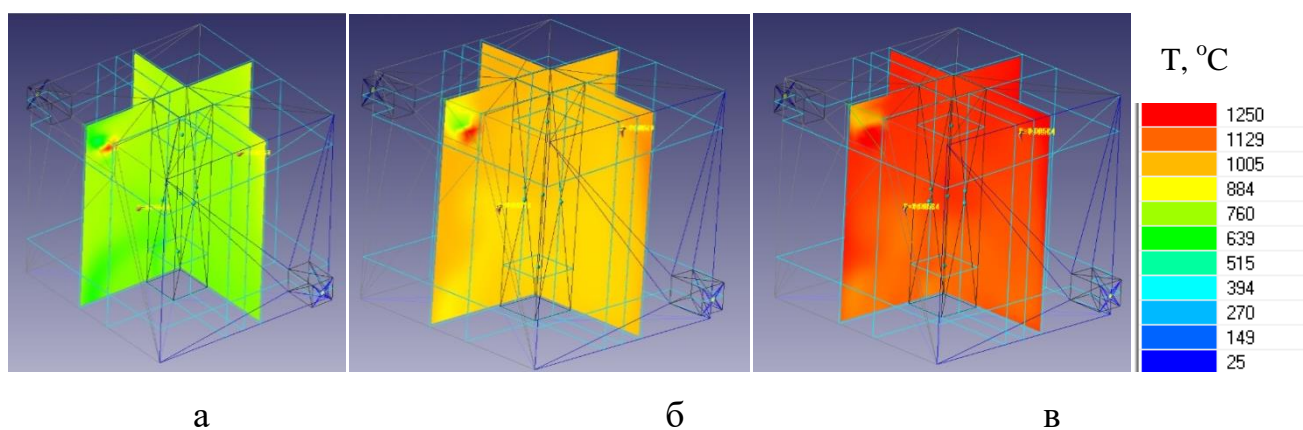


Рисунок 3.20 – Розподіл температур по обігрівальній поверхні балки під час нагрівання за стандартним температурним режимом пожежі: а – 10 хвилина, б – 30 хвилина, в – 60 хвилина

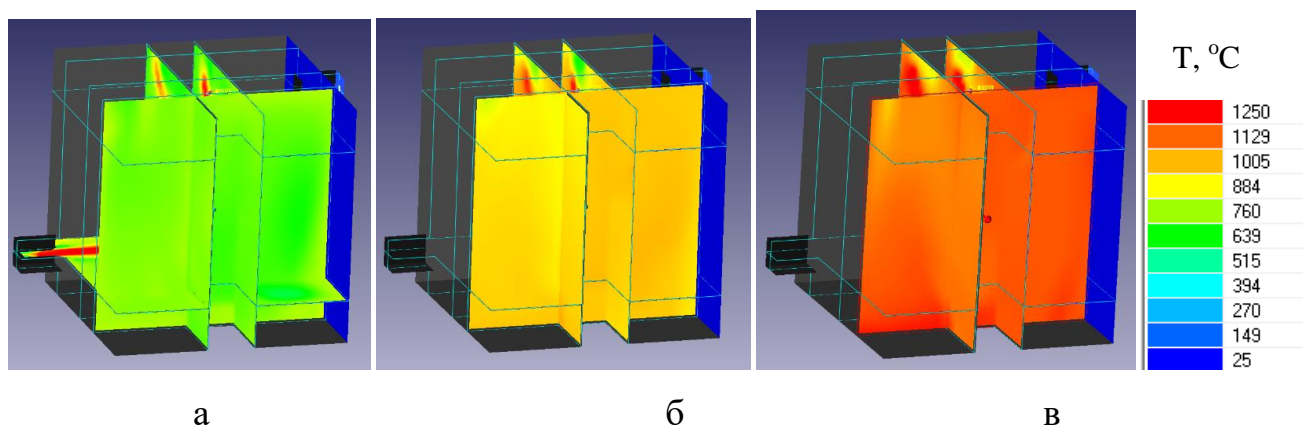


Рисунок 3.21 – Розподіл температур по обігрівальній поверхні балки під час нагрівання за стандартним температурним режимом пожежі: а – 10 хвилина, б – 30 хвилина, в – 60 хвилина

Для більш якісного аналізу моделей необхідно визначити числові показники роботи. Метою було дослідження теплового впливу на будівельні конструкції. З огляду на це доцільно забезпечити найбільш можливу рівномірність прогріву, для якісної відтворюваності даних реальних експериментів.

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

Засобами комп'ютерної газогідродинаміки «CFD» «FlowVision 2.5» створено заливки температури на обігрівальній поверхні конструкцій (рис. 3.18 – 3.21), отримано розподіл температур на кожній хвилині випробувань для кожної конфігурації [279]. У заливках температур розміщені від 1000 до 3000 контрольних точок (залежно від особливостей конфігурації), що розподілені рівномірно по поверхні конструкції, де розташовані дані щодо температури в будь-який час протягом обчислювального дослідження. На підставі опрацьованих відомостей розраховано дисперсію температур [181–183]:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n} \quad (3.4),$$

де n – кількість осередків значень температури, T_i – значення температури осередку, \bar{T} – середнє значення температури на поверхні конструкції.

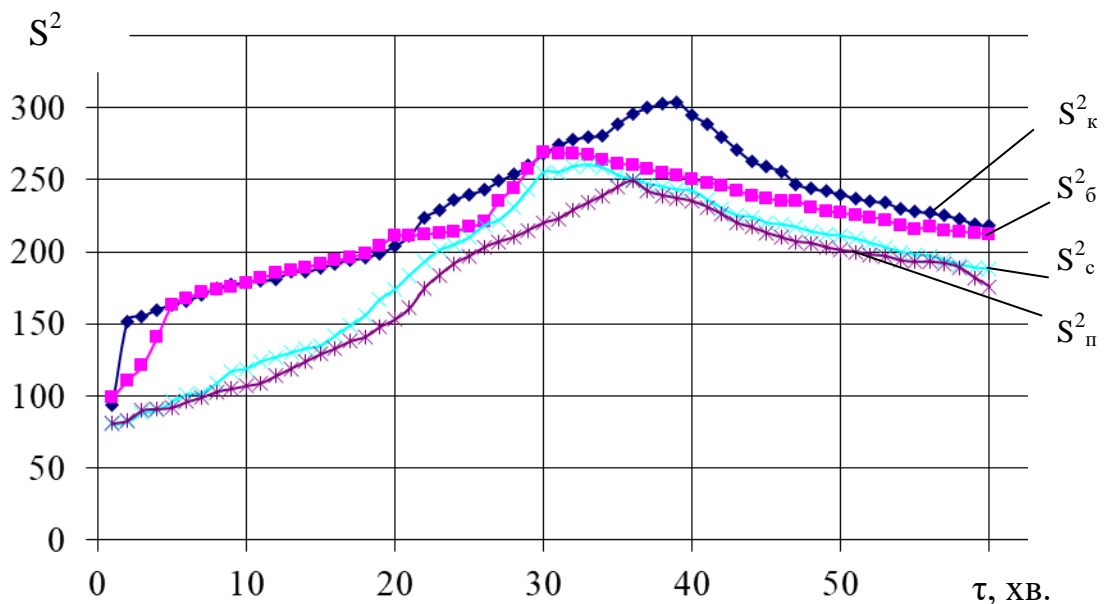


Рисунок 3.22 – Дисперсія температур по обігрівальній поверхні елементів залізобетонних будівельних конструкцій під час обчислювальних експериментів:

$S^2_{\text{к}}$ – фрагмента колони; $S^2_{\text{б}}$ – фрагмента балки; $S^2_{\text{п}}$ – фрагмента плити; $S^2_{\text{с}}$ – фрагмента стіни.

Отримані графіки мають певну особливість: у кривих, що відображають числове значення дисперсії температур, існує екстремум. Після початкової фази збільшення значення дисперсія поступово починає зменшуватися, що можна пояснити через аналіз стандартної температурної кривої пожежі [1]. Більш інтенсивною є зміна температури в камері вогневої печі на початкових хвилинах випробувань. Поступово зменшується різниця граничних значень максимуму й мінімуму. З огляду на це дослідження обмежене 60 хвилиною розрахунку (рис. 3.22).

На підставі аналізу результатів, представлених на рис. 3.22, підсумовано:

- дисперсії температур по поверхні конструкцій перебувають у межах 300, що відповідно до досліджень [57; 87] слугує показником якісного й рівномірного розподілу температури по поверхні конструкцій;
- найнижчі значення дисперсій, що не перевищили позначку 250, зафіксовані під час моделювання нагрівання плити; це вмотивоване горизонтальним розміщенням конструкції і розташуванням отвору для виходу продуктів горіння в нижній частині камери печі;
- екстремум, наявний на всіх графіках, підтверджує адекватність розрахунків; якщо проаналізувати температуру в камері печі (рис. 3.12), то стає зрозумілим, що за менш інтенсивної зміни температури в камері дисперсія поступово починає зменшуватися;
- унаслідок характеристики створеної моделі, зроблено висновок, що середнє значення часу, за якого досягають екстремуму, – 35-та хвилина випробувань, коли допустима різниця між максимальною і мінімальною температурою в камері печі зменшується [2];
- 60 хвилин достатньо для повноцінного аналізу розподілу температур по обігрівальній поверхні, оскільки в процесі подальшого нагрівання відбувається поступове зменшення дисперсії;
- вибрана конфігурація камери печі повністю задовольняє вимоги, представлені до випробувань будівельних конструкцій [2], та здатна забезпечити відтворюваність результатів.

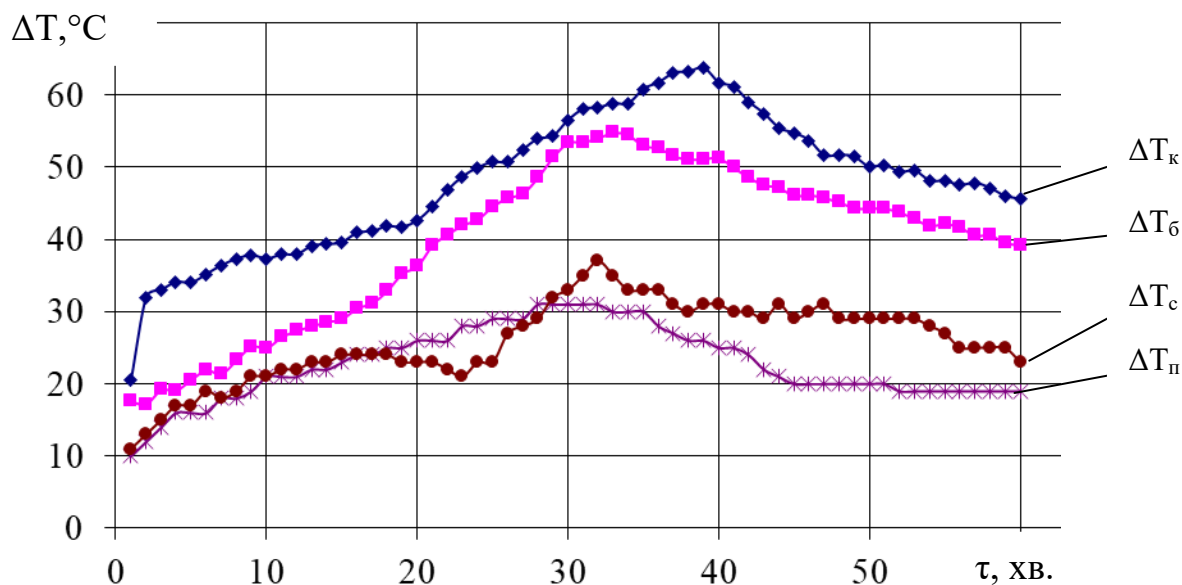


Рисунок 3.23 – Різниця між максимальною і мінімальною температурою на обігрівальній поверхні елементів залізобетонних будівельних конструкцій під час обчислювальних експериментів: ΔT_k – фрагмента колони; ΔT_b – фрагмента балки; ΔT_p – фрагмента плити; ΔT_c – фрагмента стіни.

Відповідно до рис. 3.23, максимальна різниця температур на обігрівальній поверхні елементів залізобетонних будівельних конструкцій становила: для колони – 63°C на 39 хвилині випробувань; для балки – 55°C ; для колони на 34 хвилині випробувань; для стіни – 38°C на 32 хвилині випробувань; для плити – 31°C на 30 хвилині випробувань.

Отже, аналіз створеної моделі доводить, що на обігрівальній поверхні всіх видів елементів залізобетонних конструкцій існує незначна дисперсія, яка не впливає на якість її прогрівання. Відповідно до проведеного комп'ютерного моделювання, можна констатувати достатню точність роботи вибраної конфігурації камери печі. Це дає підстави перейти від розрахунків до розроблення ескізів реальної установки з параметрами камери печі, що визначені й перевірені в третьому розділі роботи.

Висновки до розділу 3

У розділі обґрунтовано конфігурацію універсальної експериментальної установки для проведення вогневих випробувань, що здатна забезпечити відтворюваність результатів теплового впливу на всі основні види несучих залізобетонних конструкцій. Виявлено закономірності впливу конструктивних параметрів печі на теплові процеси під час вогневих випробувань.

Аргументовано вибір математичного апарату й засобів реалізації досліджень. Створення компактних печей підпорядковане принципу, за яким має бути мінімальна відстань до факелу полум'я та досягнуто універсальності печі. Попередні розрахунки виконано в програмному комплексі «FDS», а уточнені – у «FlowVision». В основі обох розрахункових програм лежить застосування повної системи рівнянь Нав'є–Стокса, що забезпечує точність результатів. Перевагами першого комплексу є швидкість розрахунку й можливість оцінити розподіл температур усередині печі, а другого – точність, можливість змінювати параметри моделі в процесі розрахунку.

Проведено аналітичне дослідження тепломасообміну в камері печі за допомогою програмного комплексу «FDS», для визначення теплового впливу пожежі на будівельні конструкції. Вибрано три з десяти запропонованих конфігурацій камер вогневих печей. Максимальної температури в конфігураціях досягнуто вже на 3 хвилині, що дорівнювало 810 °С, – 800°С та 790°С у верхній частині печей, 800°С, 780 і 770°С – у нижній частині. Абсолютне відхилення температури в горизонтальних площинах не перевищило 30°С. Використання програмного комплексу «FDS» має обмеження, що були передбачені, тому необхідно застосовувати більш потужний розрахунковий інструмент.

Виконано уточнені дослідження щодо якості прогрівання камер печей за допомогою комп'ютерного моделювання в системі «FlowVision». Сутність обчислювального експерименту полягала в ініціації процесу горіння з контролем температури всередині камери змодельованої печі так, щоб температурний режим нагріву якомога точно збігався з температурною стандартною кривою пожежі.

Результати моделювання процесу нагрівання у вибраних конфігураціях та аналіз уточнених розрахунків уможливили визначення релевантних розмірів камери печі, кількості й розміщення пальників. Мінімально можливі розміри камери – $1 \times 1 \times 1$ м, у разі використання 2 пальників, одного отвору для виходу продуктів горіння, що мають розміщуватися біля протилежної від досліджуваної конструкції стінки камери.

Змодельовано процес теплового впливу пожежі на поверхні фрагментів основних елементів будівельних конструкцій. Різниця температур на обігрівальній поверхні елементів залізобетонних будівельних конструкцій становила: для колони – 63°C на 39 хвилині випробувань; для балки – 55°C ; для колони на 34 хвилині випробувань; для стіни – 38°C на 32 хвилині випробувань; для плити – 31°C на 30 хвилині випробувань.

Дисперсія температур по обігрівальній поверхні всіх основних типів несучих залізобетонних будівельних конструкцій під час нагрівання за стандартним температурним режимом має екстремум, що перебуває на 30 – 32 хвилині за одностороннього обігріву, на 36 – 37 хвилині за тристороннього обігріву, на 39 – 40 хвилині – за чотиристороннього. Це аргументоване більш інтенсивною зміною градієнта температур у камері печі на початкових етапах дослідження та плавним підвищенням її після 30 хвилин випробувань. З'ясовано, що найбільш суттєво на значення дисперсії температур впливають об'єм камери печі, відстань від пальників до нагрівальної поверхні та висота розташування отвору для виходу продуктів горіння. На основі отриманих даних сформульовано гіпотезу, що дисперсія температур по обігрівальній поверхні фрагментів несучих залізобетонних конструкцій має лінійну залежність від зазначених параметрів.

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

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

Обґрунтовано параметри камери вогневої печі та розміщення її ключових елементів.

На основі отриманої залежності створено комп'ютерну модель універсальної малогабаритної вогневої печі й доведено здатність відтворювати результати нагрівання зразків через розрахунок нагрівання камери зі встановленими в неї фрагментами елементів несучих конструкцій (кожного окремо). Аналіз роботи створеної моделі довів, що на обігрівальній поверхні всіх видів елементів залізобетонних конструкцій існує незначна дисперсія, яка не впливає на якість її прогрівання. Відповідно до проведеного комп'ютерного моделювання, підсумовано, що вибрана конфігурація печі має достатню точність у роботі. Створено наукове підґрунтя для переходу від розрахунків до розроблення ескізів реальної установки з параметрами камери печі, що визначені й перевірені в третьому розділі, а також для подальшого створення прототипу.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ МАЛОГАБАРИТНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ НА БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

4.1. Загальні характеристики малогабаритної вогневої установки

Прототип вогневої установки створено в кілька етапів. На першому етапі проаналізовано наукові джерела, вивчено чинні вітчизняні й зарубіжні нормативні документи. Максимально взято до уваги вимоги щодо конструктивних особливостей. Пропонований метод є експериментально-розрахунковим, тому конструктивні елементи й камера печі відрізняються від наявних в Україні.

На наступному етапі досліджено камери вогневих печей щодо можливості створення необхідного температурного режиму пожежі та визначення градієнта температури по поверхні досліджуваної конструкції. На етапі розрахунків відтворено температурні поля та оцінено вогнестійкість. Перевага вибраного методу полягає в тому, що до аналізу залучено характеристики матеріалу готової будівельної конструкції. Це важливо, оскільки характеристики (якість, чистота, дисперсність тощо) одного компонента (наприклад, піску, в'язучого, крупного заповнювача, води чи арматури) впливають на межу вогнестійкості конструкції в цілому.

Запроектована установка має бути малогабаритною, проте результати експериментів і подальших розрахунків повинні відповідати результатам повномасштабних випробувань. У такому випадку можна розв'язати низку проблем, пов'язаних з оцінюванням вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій: відсутність достатньої кількості випробувальних лабораторій, неекологічність та трудомісткість випробувань, недостатня точність розрахункових методів.

За наявності кваліфікованих спеціалістів, у разі створення на своїй базі компактною установки та проведення розрахунків завод-виготовник залізобетонних виробів зможе оцінювати не тільки міцність конструкцій, а і їхню вогнестійкість. За надійність виробів

під час пожежі відповідатиме саме та організація, що їх виготовила, а не лабораторія, яка провела дослідження. Так знизиться ризик помилкового оцінювання межі вогнестійкості.

Після проведених у розділах 1 та 3 досліджень зроблено висновок, що найменш можливим розміром камери печі має бути $1 \times 1 \times 1$ м, що дасть змогу забезпечити відстань у 0,8 м від факелу полум'я до аналізованих конструкцій. Відповідно до моделювання, проведеного в розділі 3, як паливо буде використано метан, що подають через пальники з вільною (природною) ежекцією повітря ззовні камери. За висновками розділу 3, горіння суміші відбувається за температури до 1340 °C [46, 56, 195, 280], що в разі потужності пальників має забезпечити стандартний температурний режим пожежі протягом часу досліджень.

Для якісного проведення розрахункової частини необхідно, щоб установка забезпечувала рівномірність прогріву по обігрівальній поверхні. Це дасть змогу отримати розподіли температури всередині конструкції та якісно виконати подальші розрахунки її напружено-деформованого стану під час нагрівання. Крім того, заплановано створити нагрівальну систему так, щоб за необхідності була змога відтворити температурні режими, відмінні від стандартного.

У розділах 1 – 3 проаналізовано достатню кількість нормативних документів, наукових праць та інших матеріалів, що спонукало до висновку про технічну можливість, обґрунтованість і необхідність (у межах створюваної системи) створення ескізу прототипу компактної установки для випробувань залізобетонних будівельних конструкцій.

Прототип вогневої печі розміром $1\text{м} \times 1\text{м} \times 1\text{м}$, застосовуваний для вивчення вогнестійкості вертикальних несучих будівельних конструкцій, повинен оптимізувати вогневі випробування відповідно до стандартного температурного режиму.

На рис. 4.1 продемонстровано загальний вигляд камери печі установки, що змодельована в розділі 3.

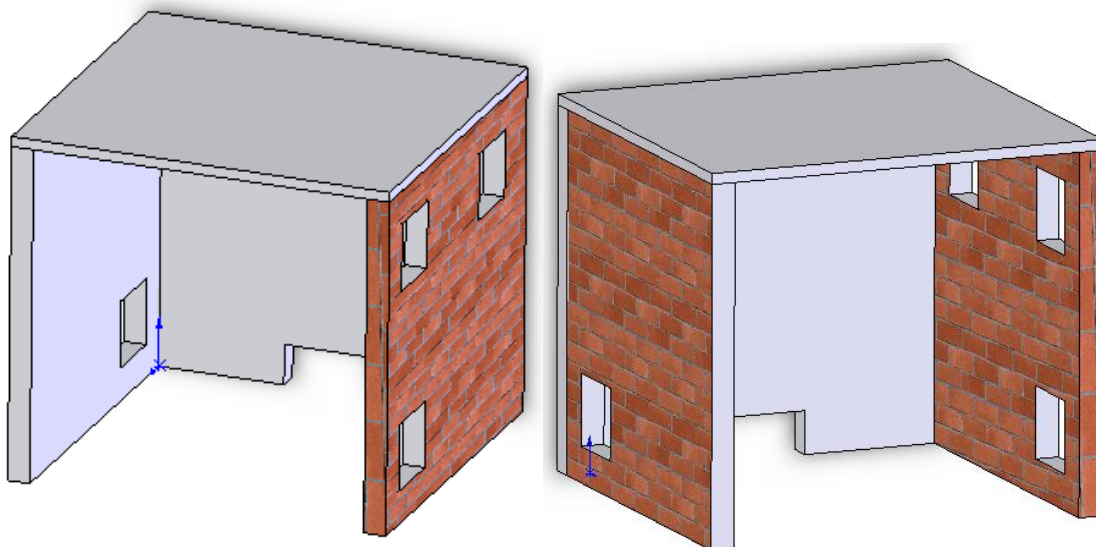


Рисунок 4.1 – Попередній ескіз камери печі універсальної установки

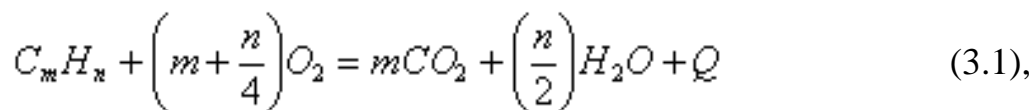
Модель установки для випробування на вогнестійкість має забезпечити стандартні умови впливу вогню щодо термічного впливу й тиску. У камері вогневої печі передбачено 4 отвори для пальників (під час експериментів застосовано лише 2 отвори з 4, натомість 2 інші закриті мінеральною ватою, що ізолює відтік повітря ззовні), та 1 отвір для виходу продуктів горіння. Димохід складається з двох частин: убудована труба діаметром 20 см, що закладена цеглою в один ряд.

Знімні кришки – зварений металевий каркас, де розміщена мінеральна вата, поверх якої з боку, що зазнає температурному впливу, закріплені листи з магнезиту (як перспектива – нержавної сталі).

Вогневу піч буде виконано з трьох сторін, п-подібної форми. Один бік конструкції не збудовано, що допомагає вивчати фрагменти елементів залізобетонних конструкцій в умовах стандартного температурного режиму пожежі.

Необхідно провести розрахунок потужності газових пальників та максимально можливої температури в печі. Розрахункове визначення температури горіння суміші природного газу й повітря – достатньо складне завдання. На температуру, крім складу суміші та властивостей компонентів, впливає навколишнє середовище. Зростання температури вихідних компонентів призводить до збільшення температури горіння. Теплообмін із довкіллям і реакції дисоціації, навпаки, зменшують температуру горіння [280; 281].

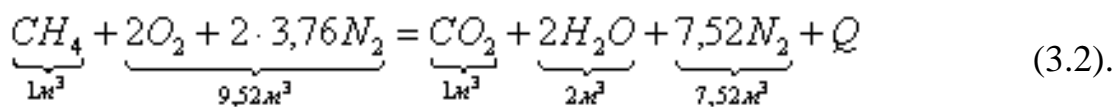
Загальне рівняння реакції горіння будь-якого вуглеводню має такий вигляд [195; 280–282]:



де: m , n – кількість атомів вуглецю і водню в молекулі; Q – теплота згорання.

Теплота згорання (Q) – кількість теплоти, що виділяється за повного згорання 1 м^3 (1 кг, 1 кмоль), у разі нормальних фізичних умов ($P=101325$ Па, $t=0$ °C). У [282] подано стандартні значення вищої і нижчої теплоти згорання основних компонентів природного газу.

Реакція горіння 1 м^3 метану в повітрі (кисень – 21 %, азот – 79 %) має такий вигляд:



Для стехіометричного спалювання 1 м^3 метану необхідно 2 м^3 кисню або $9,52\text{ м}^3$ сухого повітря. Унаслідок спалювання в продуктах згорання утворюється 1 м^3 CO_2 , 2 м^3 H_2O та $7,52\text{ м}^3$ N_2 .

Адіабатичну температуру горіння суміші відомого складу (без теплообміну з довкіллям) розраховують відповідно до першого закону термодинаміки. Тепло, що виділяється під час горіння, повністю витрачається на нагрівання продуктів горіння [59].

У разі спрощених розрахунків диференціюють такі температури горіння газів: калориметрична, теоретична, дійсна (розрахункова), жаропродуктивність. Для таких температур характерні різні зовнішні фактори, що позначаються на температурі горіння [195]. Зокрема, жаропродуктивність визначає температуру горіння суміші за $a=1$ (кількість окислювача увідповіднена з мінімальною необхідною для повного спалювання) та початкової температури газу й повітря 0 °C. Калориметрична температура залежить від коефіцієнта надлишку повітря і

температури суміші, що подана на горіння. Теоретична температура додатково відображає теплоту, що витрачена на дисоціацію. Дійсну температуру визначають із добутку теоретичної на коефіцієнт h , який ураховує втрати на теплообмін із довкіллям (стінками печі), віддачу теплу випромінюванням, швидкість потоку та інше. Іншими словами, h – це к. к. д. конкретної камери згорання.

Формула для визначення теоретичної температури [282]:

$$t_T = \frac{Q_H^P + q_{\text{фіз}} - q_{\text{дис}}}{\sum (V_i \cdot c_{p_i})} \quad (3.3),$$

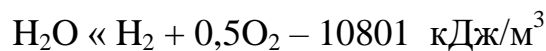
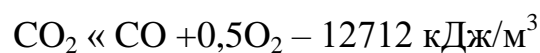
де Q_H^P – нижча теплота згорання газу, кДж/м³;

$q_{\text{фіз}}$ – тепловміст (фізична теплота) газу й повітря, що відраховують від 0 °С, кДж/м³;

$q_{\text{дис}}$ – кількість тепла, що поглинається під час процесу дисоціації вуглецю та водяного пару, кДж/м³;

$\sum (V \cdot c_p)$ – сума добутків об'ємів і середніх об'ємних теплоємностей компонентів продуктів згорання газу за постійного тиску.

Дисоціація водяних парів і вуглекислого газу являє собою ендотермічну реакцію, тобто реакцію з поглинанням тепла та збільшенням об'єму [282].



Тепло, що витрачають на дисоціацію водяної пари й діоксиду вуглецю, визначають за формулою [282]:

$$q_{\text{дис}} = 108,01 \cdot a \cdot V_{\text{H}_2\text{O}} + 127,12 \cdot a \cdot V_{\text{CO}_2}, \text{ кДж/м}^3 \quad (3.4),$$

де a , b – ступінь дисоціації діоксиду вуглецю та водяної пари, %.

Характеристики камери установки, що отримані за розрахунками, систематизовано в табл. 4.1.

Загальні характеристики випробувальної установки

Параметр	Одиниці виміру	Величина
Потужність	кВт	100
Максимальна температура нагріву простору камери	°С	1050
Об'єм робочої камери	м ³	1
Габаритні розміри (внутрішнього простору камери печі): ширина довжина висота	мм мм мм	1000 1000 1000
Максимальна швидкість нагріву камери	°С/хв.	85

На рис. 4.2 представлено основні елементи запроєктованої камери печі прототипу малогабаритної установки для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції.

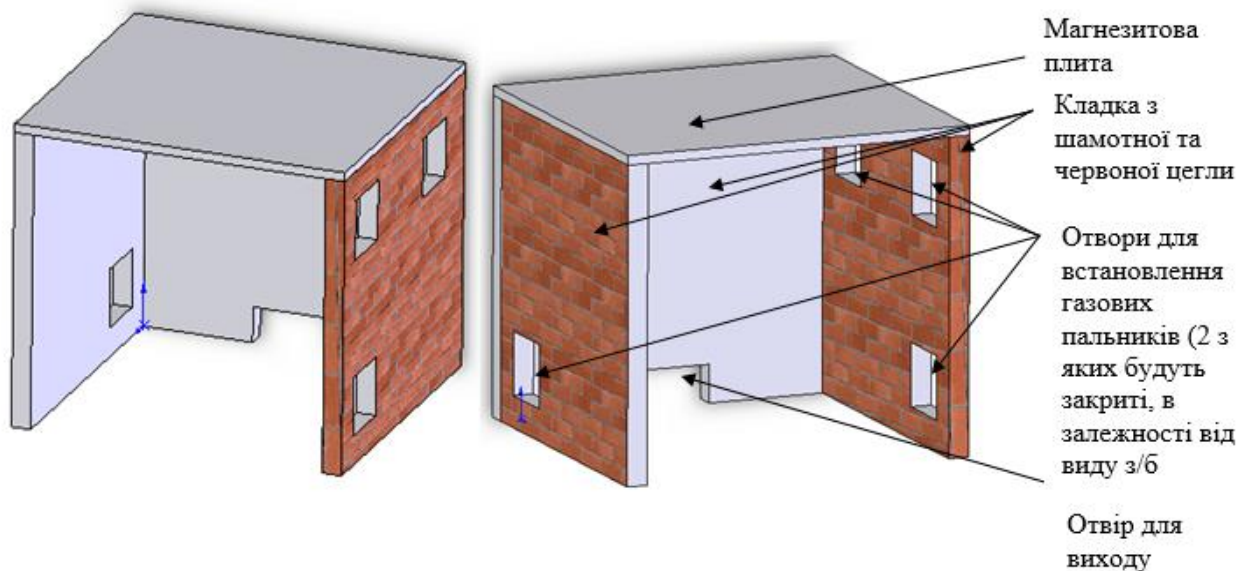


Рисунок 4.2 – Елементи камери печі запроєктованого прототипу установки

Виконання корпусу печі заплановано з трьох сторін, п-подібної форми. Одну сторону конструкції не збудовано, що дає змогу досліджувати фрагменти як вертикальних, так і горизонтальних конструкцій.

Для закривання печі з верхньої і передньої сторін запроєктовано спеціальні знімні панелі. Цей елемент складається з каркасу, мінеральної вати та магнезиту (рис. 4.3).

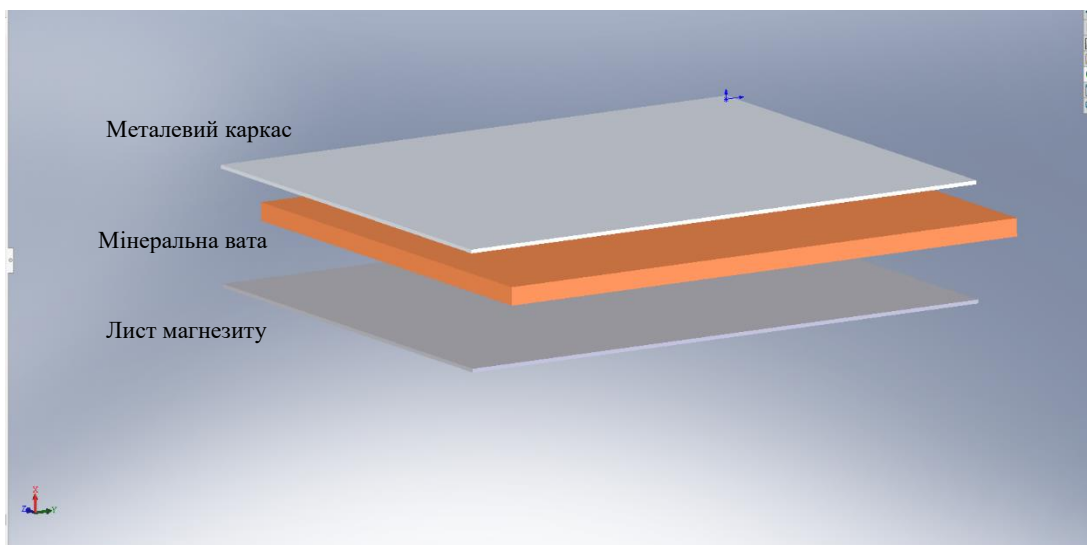


Рисунок 4.3 – Верхня знімна панель камери печі на основі мінераловати та магнезиту

Для дослідження температурного режиму в камері вогневої печі використано термопари, загальний вигляд і схему будови яких представлено на рис. 4.4.

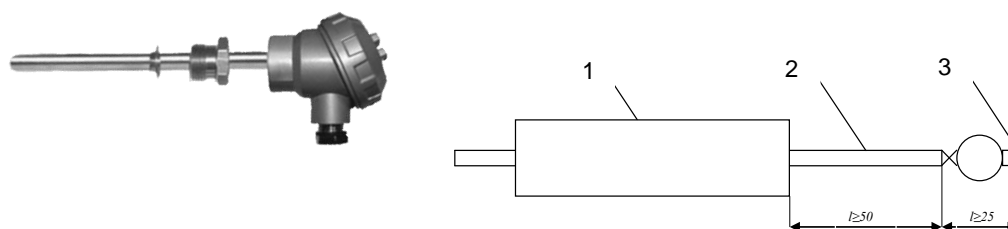


Рисунок 4.4 – Загальний вигляд і схема термопар для вимірювання температур у робочому просторі печі: 1 – теплозахисна оболонка; 2 – захисний кожух; 3 – вимірювальний спай.

Для вимірювання температури в печі застосовано термопари ТХА-2388 із діаметром дроту 1,25 мм (рис. 4.4), що можна використовувати для вимірювання температури в діапазоні від 0 до 1300 С.

На рис. 4.5. зображено схему побудови малогабаритної установки для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції.

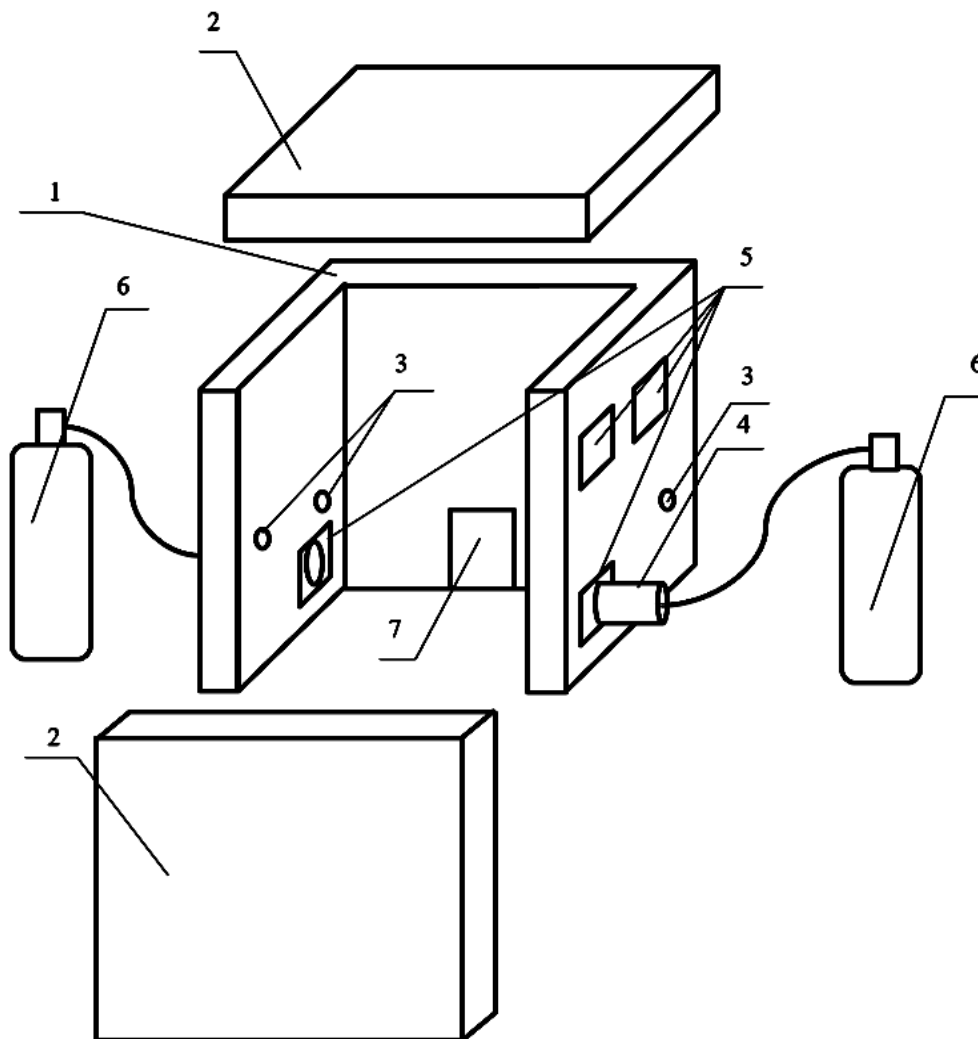


Рисунок 4.5 – Загальна схема малогабаритної установки для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції: 1 – п-подібне огородження печі; 2 – знімні панелі; 3 – отвори для встановлення датчиків контролю температури; 4 – пальники; 5 – отвори для встановлення пальників; 6 – газовий балон із регулювальним апаратом; 7 – отвір для відведення продуктів горіння.

Для одержання цифрових значень температури в місцях установки термопари використано модуль аналого-цифрового перетворення (АЦП) сигналу термопари. Цей

модуль спеціально розроблено в інституті. Модуль дає змогу вимірювати температуру з чутливістю в $0,25^{\circ}\text{C}$, побудований на базі мікросхеми max. 31855. Така мікросхема вможливує перетворення аналогового цифрового сигналу термопар на цифровий із максимальним значенням температури до 1350°C . Модуль ураховує температуру холодних спаїв, а також автоматично корегує значення температури.

Для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції малогабаритну установку використовують так: до п-подібного огороження печі 1 встановлюють фрагмент залізобетонної конструкції; залежно від виду конструкції, застосовують одну або дві знімні панелі 2. В отвори для датчиків контролю температури 3 та в досліджуваному зразку (на схемі відсутній) встановлюють датчики температури (на схемі відсутні). Далі запалюють пальники 4, які наявні в отворах для пальників 5. За допомогою подання газу з газового балона 6 усередині камери печі створюється заданий температурний режим. У нижній частині камери печі розміщено отвір для відведення продуктів горіння 7. Передбачено технічну можливість змінити розміри отвору для відведення продуктів горіння, що дає змогу додатково регулювати процес прогрівання камери печі та температурний режим пожежі. Контроль температури досліджуваного зразка проводять за допомогою спеціальних технічних засобів (на схемі відсутні). Результати вогневих експериментів обробляють відповідно до чинних стандартів. На цій основі формулюють висновки про фактичну межу вогнестійкості та її ступінь.

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

Після будівництва установки й конструювання допоміжних елементів створено систему пальників для нагрівання за допомогою подання природного газу в камеру, відповідно до розрахунку, проведеного в розділі. Пальники – знімні, як зображено на схемі рис. 4.5.

Після створення установки заплановано тестові запуски. Розрахунки, проведені в розділі 3, продемонстрували, що в камері печі можливо забезпечити стандартний температурний режим пожежі в разі використання розрахункового подання палива. Під час розрахунків до уваги не взято низку факторів, зокрема негерметичність камери й фізичні процеси, що відбуваються в процесі подання метану.

Кількість тестових запусків і вдосконалення установки, що необхідно провести, залежить від отриманих результатів.

На рис. 4.6 зображено загальний вигляд розміщення запроєктованого прототипу випробувальної установки на території комплексу

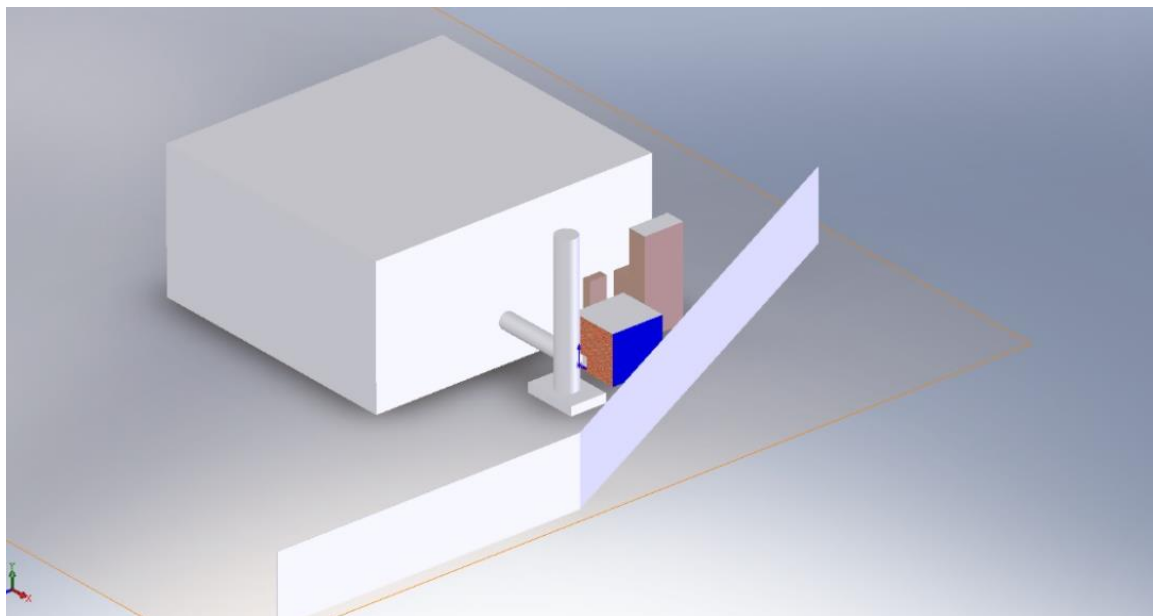


Рисунок 4.6 – Загальний вигляд розміщення запроєктованого прототипу випробувальної установки на території Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України

Згідно з рис. 4.6., існує місце безпосередньо за банним комплексом, де можливо під'єднатися до димоходу. Крім того, у безпосередній близькості наявний доступ до електроенергії та води. Будівництво установки відбувалося в цьому місці.

Для дослідження вогнестійкості несучих будівельних конструкцій використано вогневу піч. Етапи її створення представлено на рис. 4.7.



1



2



3



4

Рисунок 4.7 – Підготовка фундаменту малогабаритної установки для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції

Відповідно до рис. 4.7, фундамент під вогневу піч створено поетапно: підготовлено котлован для основи під піч, встановлено опалубок, вирівняно й укладено піщано-щебневий шар для трамбування, укладено залізобетонну плиту та залито її рідкою цементною сумішшю як основу печі, для зменшення тепловтрат через нижню частину камери використано вогнетривку цеглу.



5



6



7



8

Рисунок 4.8 – Етапи створення камери вогневої печі малогабаритної установки для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції.

Згідно з рис. 4.8, піч виконано з вогнетривкої цегли, де створено 4 отвори для пальників (під час натурального випробування використано лише 2 отвори, залежно від виду аналізованої будівельної конструкції) та 1 отвір для виходу продуктів горіння. Димохід побудований із 2 частин: убудована труба діаметром 20 см, цегла в один ряд і кришка (зварений каркас із металу, де розташована мінеральна вата, поверх якої з обох боків закріплені листи магнезиту).

4.2. Результати та аналіз тестових запусків печі. Удосконалення конструктивних елементів установки

4.2.1. Мета та завдання тестових запусків. Мета тестових запусків – перевірка можливості проведення експериментально-розрахункового методу щодо визначення вогнестійкості будівельних конструкцій у прототипі вогневої установки як наукове підґрунтя для створення та обґрунтування методу оцінювання вогнестійкості.

Завдання тестових запусків:

– перевірка можливості забезпечення необхідного температурного режиму в камері печі;

- налагодження роботи газових пальників;
- коригування розмірів отвору для виведення продуктів горіння;
- визначення необхідної кількості палива та інтенсивності його подання;
- перевірка герметичності камери печі, необхідне корегування;
- перевірка якості роботи системи відведення димових газів;
- налагодження роботи засобів вимірювальної техніки;
- корегування для надійної та коректної роботи установки.

Суть експериментів полягала в запуску установки та відтворюванні стандартного температурного режиму пожежі. Передбачено застосування 2 газових пальників від газового балона. Контроль подання покладений на оператора.

Кількість тестових запусків залежатиме від виявлених недоліків і складності їх усунення.

4.2.2. Нормативна база. Для проведення випробувань використано метод, що увідповіднений із нормативними документами:

ДСТУ Б В.1.1-4-98*

Захист від пожежі. Будівельні конструкції.

Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги [2].

ДСТУ Б В.1.1–19:2007	Несучі стіни. Метод випробування на вогнестійкість [32].
ДСТУ Б В.1.1–20:2007	Захист від пожежі. Перекриття та покриття. Метод випробувань на вогнестійкість [33].
ДСТУ Б В.1.1–14:2007	Захист від пожежі. Колони. Метод випробувань на вогнестійкість [34].
ДСТУ Б В.1.1–13:2007	Захист від пожежі. Балки. Метод випробування на вогнестійкість [31].
ДСТУ 2272:2006	Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять [28].
НАПБ А.01.001–2014	Правила пожежної безпеки в Україні [27].
ДБН В.2.6-98:2009	Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [29].
ДБН В. 1.1.7–2016	Пожежна безпека об'єктів будівництва [1].

4.2.3. Місце та умови проведення випробувань. Навчальний комплекс практичної підготовки фахівців Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України (с. Свидівок Черкаського району Черкаської області). Зовнішні умови:

– дата проведення випробувань:	05.05, 19.05, 16.06.2021;
– температура повітря:	26 ⁺¹ , 26 ⁺¹ , 28 ⁺¹ °С;
– вологість повітря:	54, 56, 57 %;
– вітер північний (північно-східний):	1-3 м/с.

4.2.4. Методика випробувань. Загальна методика проведення випробувань у малогабаритній вогневій установці полягає у створенні стандартного

температурного режиму пожежі в камері вогневої печі за допомогою газових пальників.

Контроль температури реалізований за допомогою трьох термопар, що розташовані в камері печі.

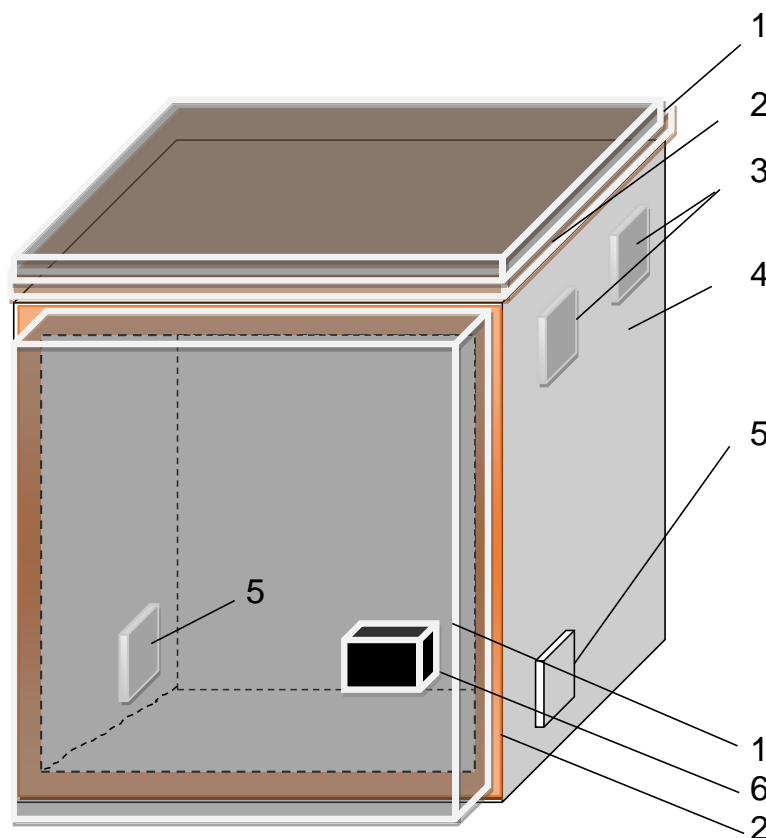


Рисунок 4.9 – Схема випробувальної установки: 1 – кришка, що закриває верхню та передню частини установки; 2 – уплотнювач із мінеральної вати та вапняного шнура; 3 – верхні отвори для пальників; 4 – огородження печі; 5 – нижні отвори для пальників; 6 – отвір виходу продуктів горіння

До початку випробування зафіксовано дату проведення дослідження, температуру навколишнього повітря, вологість повітря, силу та напрям вітру (розділ 4.2.3). Верхня та передня частини установки закриті кришкою. Для щільності прилягання застосовано мінеральну вату. Використано два отвори для встановлення пальників. Два інші герметично закупорені мінеральною ватою і шамотною цеглою. Конструкцією передбачена можливість регулювати розміри

отвору для відведення продуктів горіння. На рис. 4.10 продемонстровано фото камери печі, яку необхідно протестувати.



Рисунок 4.10 – Фото камери печі та установки ззовні напередодні проведення тестових запусків

Температурний режим пожежі створено за допомогою двох пальників, які розміщені в нижній частині камери печі, щоб факели полум'я були розташовані не менше ніж на 80 см до верхньої кришки. Як засіб зберігання палива застосовано 1 газовий балон, що через систему трубопроводів під'єднано до пальників. На час проведення тестових запусків місця для пальників, які не використовували, закладені цеглою і мінеральною ватою для запобігання виходу пічних газів через отвори (рис. 4.10).

Мета тестових запусків – насамперед перевірка можливості створення стандартного температурного режиму пожежі [2], а також підтвердження розрахункових даних щодо рівномірності прогріву камери вогневої печі.

4.2.5. Засоби вимірювальної техніки. До початку випробувань встановлено термомпари типу ТХА для контролю температурного режиму та перевірки можливості його відповідності «стандартному». Перший запуск мав

сформувати уявлення про недоліки в конструкції, тому використано лише три термопари, схема розташування яких подана на рис. 4.11.

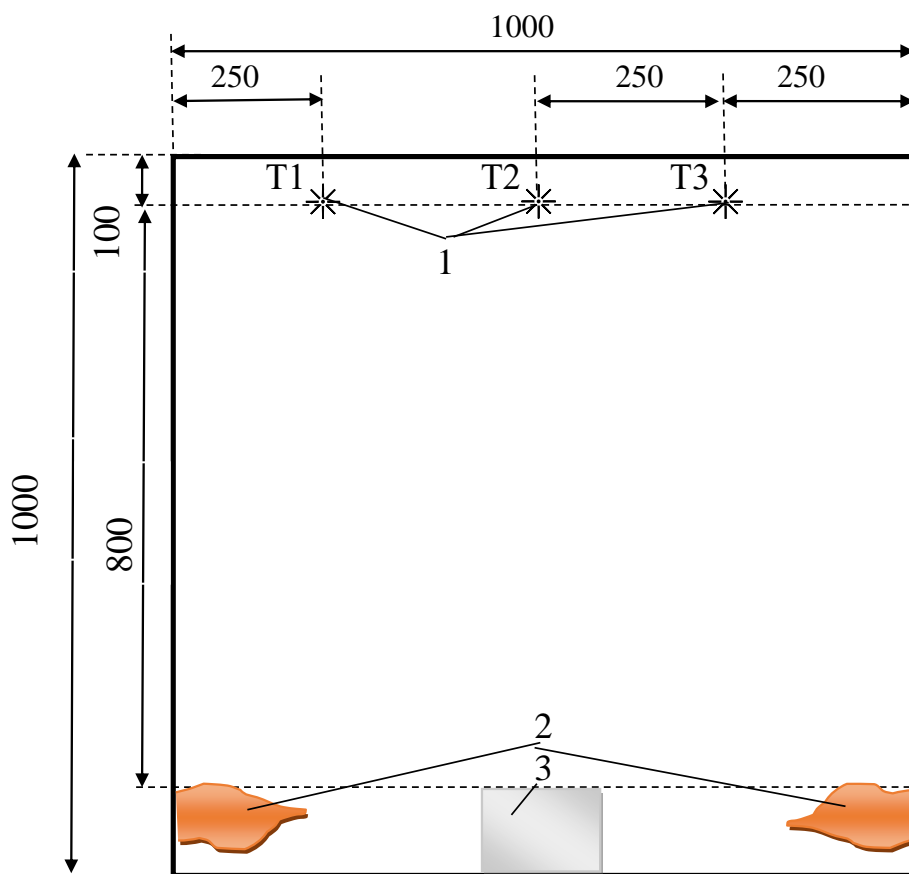


Рисунок 4.11 – Схема розташування засобів вимірної техніки під час тестових запусків установки: 1 – термопари ТХА; 2 – факели полум'я; 3 – отвір для виходу продуктів горіння

Згідно з рис. 4.11, засоби вимірної техніки (термопари Т1 – Т3), встановлені до початку тестових запусків, розміщено на 100 мм нижче від обігрівальної поверхні. Відстань до факелу полум'я не менше як 800 мм. Для цього пальники розміщено в нижній частині. Подібна схема за задумом має бути використана для нагрівання фрагментів плит.

У таблиці 4.2 систематизовано засоби вимірної техніки, використані під час натурального експерименту тестових запусків.

Засоби вимірювальної техніки

№ з/п	Найменування обладнання або приладу	Заводський номер	Діапазон вимірювання	Похибка вимірювань
1.	Лінійка вимірювальна	-	0 – 1000 мм	± 1 мм
2.	Секундомір СОС пр-2б-2-000	3401	0 – 60 с, 0	Станд. Станд.
3.	Психрометр аспіраційний МВ-4М	14689	10% – 100% –10°C – 50°C	± 4 % ± 0,2 °C
4.	Штангенциркуль ЩЦ-1	3339340	0 – 125 мм	± 0,1 мм
5.	Барометр-анероїд М67	797	600 – 800 мм рт.ст.	± 1 мм рт.ст.
6.	Анемометр АСО-3	12952	0,3 м/с – 5 м/с	± (0,1+0,05V) м/с
7.	Термопара ТХА-2388*	2388 з модулем АЦП	–200 до +700 °C від +700 до +1350°C	± 2,0 °C ± 4,0 °C

* – термопари ТХА – 3 шт.

На рис. 4.12 представлено фото засобів вимірювальної техніки та блоку дешифрування, що застосовані для першого тестового запуску.

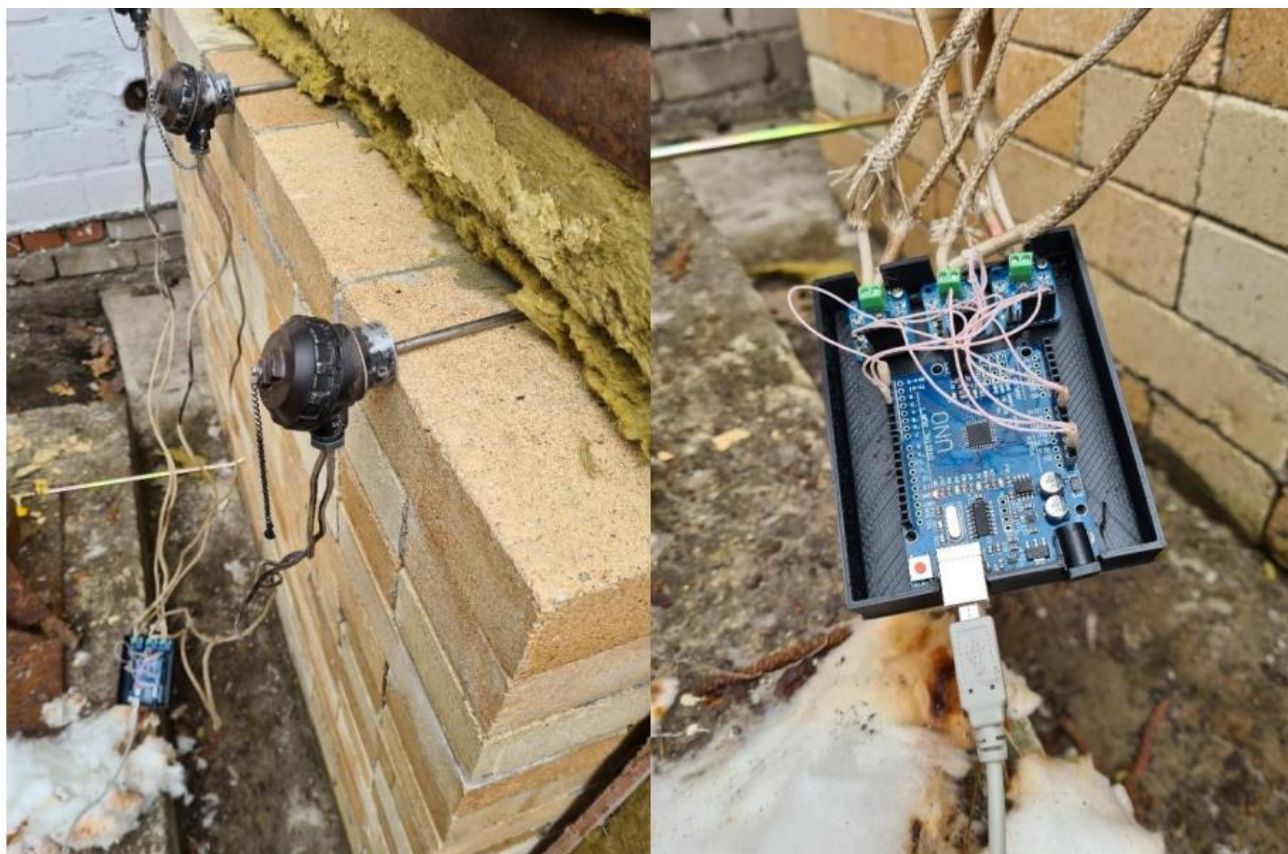


Рисунок 4.12 – Фото розташування засобів вимірювальної техніки під час першого тестового запуску установки

Для фіксації значень температури в місцях установки термопар спеціально розроблено і виготовлено прототип модуля аналого-цифрового перетворення (АЦП) сигналу термопар. Модуль побудований на базі мікросхеми max. 31855, що дає змогу перетворити аналоговий цифровий сигнал від 5 термопар на цифровий із максимальним значенням температури до 1350 °С. У процесі роботи його було вдосконалено.

Для опрацювання отриманих даних використано плагін «PLX DAQ» для «Microsoft Excel», що допомагає в режимі реального часу фіксувати значення температури й будувати графіки.

4.2.6. Аналіз результатів тестового запуску № 1. Під час тестового запуску проведено фотофіксацію експерименту. На рис. 4.13 та рис. 4.14 представлено фото вогневої установки під час роботи.



Рисунок 4.13 – Вигляд вогневої печі на першій хвилині випробування



Рисунок 4.14 – Вигляд вогневої печі в процесі випробування

Під час запуску простежували виділення димових газів з-під кришок печі. Крім того, температурний режим у камері печі не відповідав стандартному через занадто великий тиск у газовому балоні.

Згідно з рис. 4.14, для належної ізоляції камери печі недостатньо ущільнювача лише з мінеральної вати. Продукти згорання виходили не тільки через витяжний отвір, а й через недостатньо якісне ущільнення кришок. Крім того, виявлено ще один проблемний момент, який унаочнений на рис. 4.15.



Рисунок 4.15 – Вигляд газового балона системи нагрівання камери печі після 30 хвилини випробувань

Отже, проблемним стало зниження температури газу всередині балона та, отже, зниження тиску всередині. Через це знизилась інтенсивність подання газу в пальники й недостатньої кількості енергії для нагрівання камери печі.

Під час першого запуску використано лише один газовий балон. Проблему розв'язано через зміну конфігурації системи нагрівання, що застосовує два газові балони.

На рис. 4.16 продемонстровано температурний режим нагріву камери печі під час тестового запуску № 1.

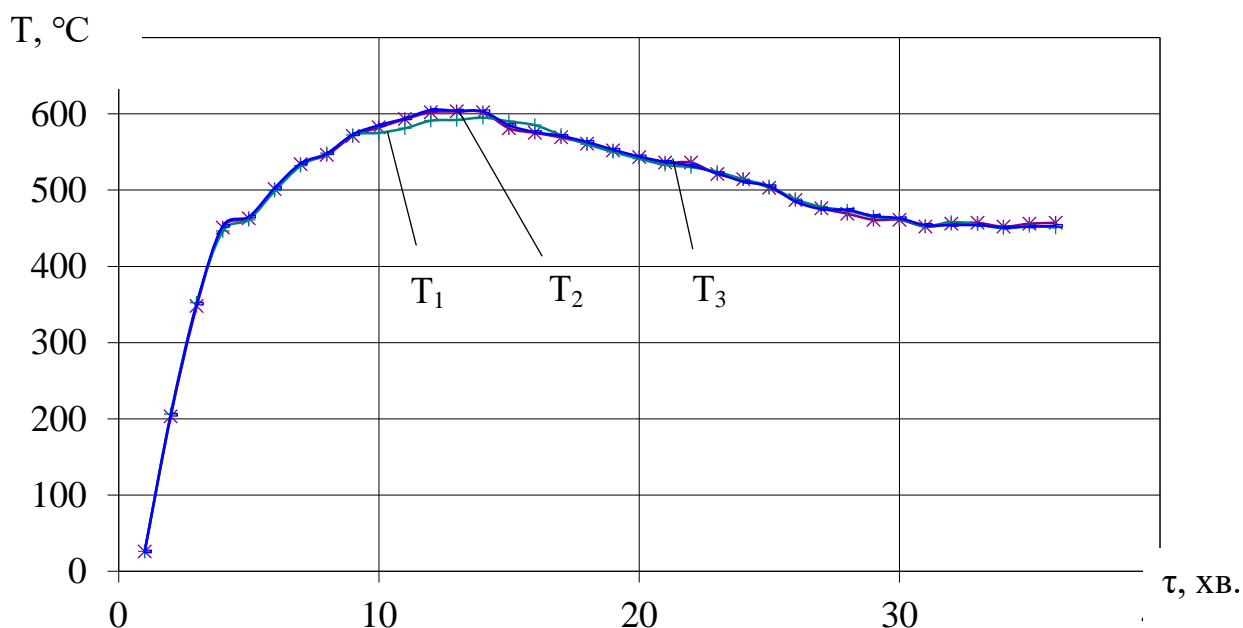


Рисунок 4.16 – Лінійна швидкість нагрівання камери печі під час тестового запуску № 1: T_1 – T_3 – покази термопар у камері печі.

Як засвідчують дані прогріву термопар (рис. 4.16), лінійна швидкість нагрівання камери печі не відповідала «стандартній» температурній кривій пожежі, перебуваючи в стандартних межах [2] лише до 10 хвилини. За досягнення значення 600 С встановлено максимум тиску, що міг видавати балон. Після цього простежуване зниження тиску в балоні, його обмерзання та зниження температури в камері печі. Випробування припинено на 37 хвилині.

Проведено візуальний огляд установки після завершення тестового запуску й виявлено деформацію внутрішньої поверхні кришки, що відображено на рис. 4.17.



Рисунок 4.17 – Вигляд камери печі після припинення тестового запуску № 1

Відповідно до рис. 4.17, прогинання магnezитових листів відбулося в середній частині верхньої кришки на місці їхнього стику. Розмір листів: 1200×600 мм, що не дає змоги використовувати цільний лист, а передбачає складання двох листів для кожної панелі.

4.2.7. Аналіз результатів тестового запуску № 2. На рис. 4.18 зображено зовнішній вигляд печі перед початком тестового запуску № 2.



Рисунок 4.18 – Вигляд вогневої печі перед початком тестового запуску № 2

Під час тестового запуску проведено фотофіксацію експерименту. Узято до уваги недоліки тестового запуску № 1:

- закріплено магнезитові листи в середній частині для запобігання їх прогинанню;
- для ліпшої герметизації камери печі в місцях прилягання кришок до стінок камери, окрім мінераловати, застосовано вапняний шнур;
- перероблено систему подання газу так, щоб одночасно були застосовані два газові балони, для запобігання надмірному охолодженню пропан-бутанової суміші та для забезпечення необхідного тиску на пальниках;
- змінено місця розміщення термопар для контролю температури в усій камері, а не лише у верхній її частині.

На рис. 4.19 – 4. 21 відображено результати тестового запуску № 2.



Рисунок 4.19 – Вигляд вогневої печі на 20 хвилині тестового запуску № 2 в процесі випробування

Згідно з рисунком 4.19, на початковому етапі випробувань майже не виділялися пічні гази через ущільнення між кришками та камерою. Це засвідчує правильний спосіб вибору ізоляції.

Під час запуску зафіксовано зменшення кількості виділення димових газів з-під кришок печі на початкових хвилинах експерименту. Крім того, температурний режим у камері печі довше відповідав стандартному, проте в процесі був зруйнований магнезит кришок.



Рисунок 4.20 – Вигляд верхньої кришки після завершення випробувань

На рисунку 4.20 продемонстровано стан магнезитової плити (внутрішнього шару кришки), що прилягала безпосередньо до камери печі. Незважаючи на заявлені в сертифікатах магнезитових плит граничні температури в 1200 °С, він не витримує тривалого нагріву, відповідно до стандартної температурної кривої пожежі.

У зв'язку з цим стало необхідним коригування конструкції знімних панелей. Насамперед потрібно було замінити магнезитові листи, але не на нові, а на виконані з іншого матеріалу.

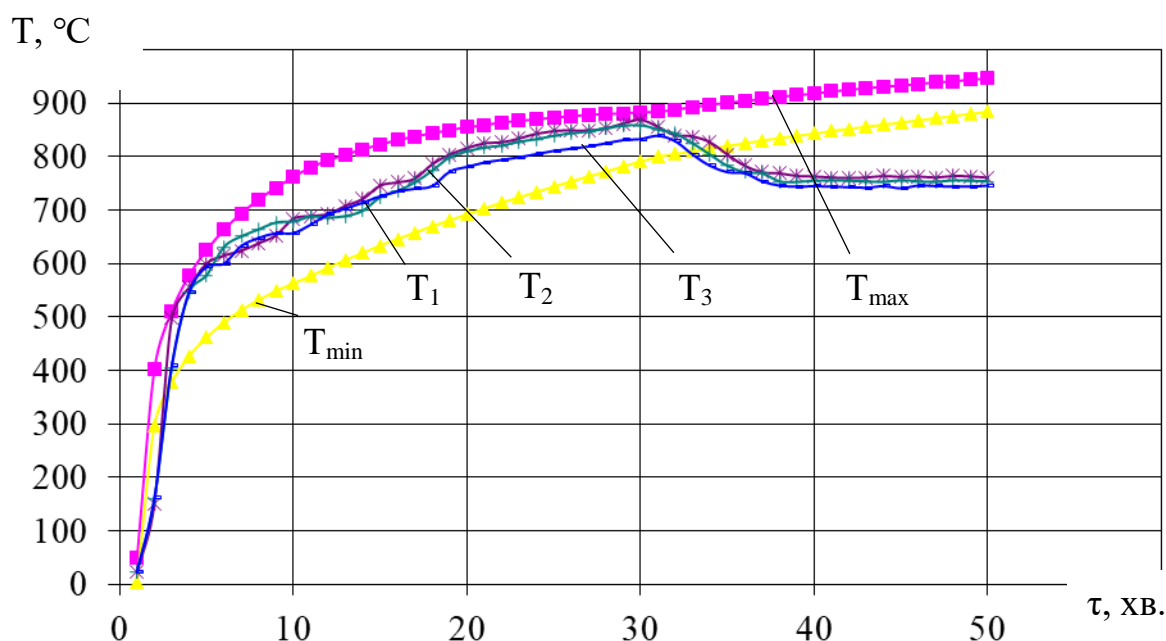


Рисунок 4.21 – Лінійна швидкість нагрівання камери печі під час тестового запуску № 2: $T_1 - T_3$ – покази термопар у камері печі, T_{\min} , T_{\max} – верхня та нижня температурні границі під час нагрівання за стандартним температурним режимом пожежі.

Як засвідчують дані прогріву камери печі (рис. 4.21), температура в камері перебувала в межах «стандартних» випробувань і плавно продовжувала зростати до 31 хвилини експерименту. Момент початку зниження температури дає підстави говорити про деструкцію магnezитових плит кришок. Далі температура знизилась і вийшла на плато. Продовжувати експеримент стало недоцільним, тому його зупинено на 51 хвилині.

4.2.8. Аналіз результатів тестового запуску № 3. Однією з особливостей третього тестового запуску було те, що магnezит знімних панелей замінено на листи з нержавної сталі, які здатні витримувати до 1500 °C [95, 192, 196, 283]. На рис. 4.22 представлено вигляд модернізованих під досліди кришок камери печі.



Рисунок 4.22 – Вигляд засобів для ізоляції камери вогневої печі (знімних панелей) для проведення тестового запуску № 3

На рис. 4.23 зображено зовнішній вигляд печі перед початком тестового запуску № 2.



Рисунок 4.23 – Вигляд вогневої печі перед початком тестового запуску № 3

Під час тестового запуску проведено фотофіксацію експерименту. Узято до уваги недоліки тестових запусків №№ 1 та 2 (рис. 4.22):

- замінено магнезитові листи на листи з нержавної сталі;
- для ліпшої герметизації камери печі в місцях прилягання кришок до стінок камери, крім мінераловати та вапняного шнура, застосовано світлоповертальний теплоізоляційний матеріал;
- систему подання газу та місця розміщення термопар залишено без змін.

Під час тестового запуску № 3 майже не виявлено виділення димових газів з-під кришок печі протягом усього експерименту. Крім того, температурний режим у камері печі відповідав стандартному. На рис. 4.24 відображено результати прогріву камери печі під час тестового запуску № 3.

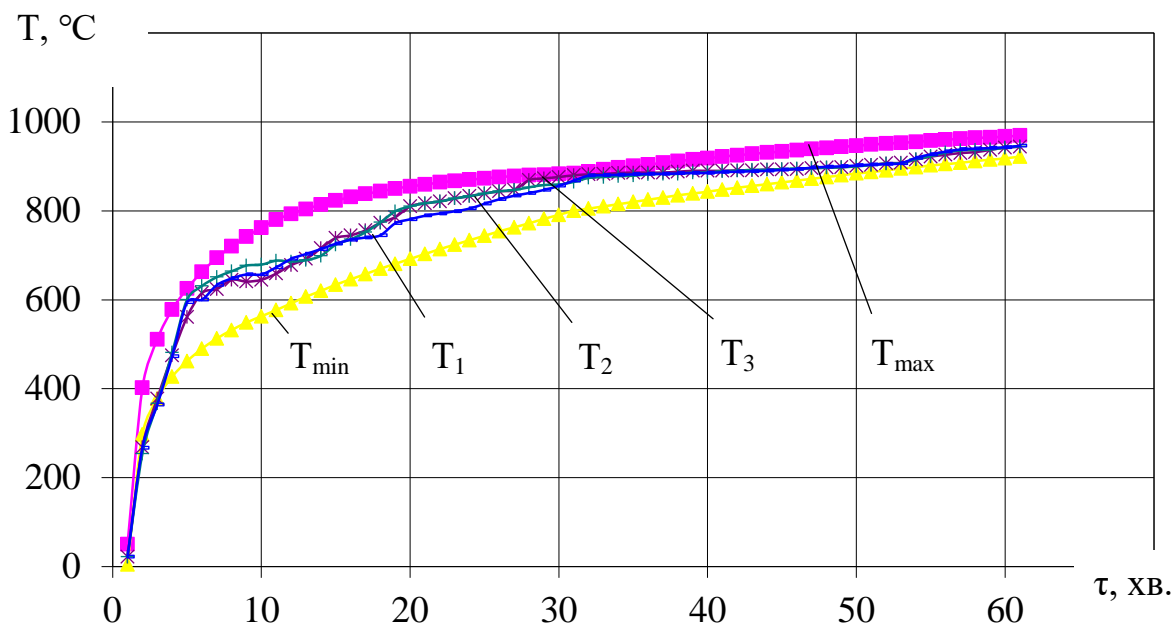


Рисунок 4.24 – Лінійна швидкість нагрівання камери печі під час тестового запуску № 3: $T_1 - T_3$ – покази термопар у камері печі, T_{\min} , T_{\max} – верхня та нижня температурні межі під час нагрівання за стандартним температурним режимом пожежі.

Як засвідчують дані прогріву камери печі (рис. 4.24), температура в камері перебувала в межах «стандартних» випробувань і плавно продовжувала зростати протягом усього експерименту. На 61 хвилині ще була можливість збільшити інтенсивність подання палива й підвищити температуру. Зроблено висновок про можливість забезпечення температурного режиму в камері вогневої печі, що відповідає необхідним умовам випробувань. Продовжувати експеримент стало недоцільним, тому його зупинено на 61 хвилині.

На підставі аналізу тестових запусків отримані результати (розділ 3.2) систематизовано та сформульовано висновки:

- налагоджено систему подання палива для нагрівання камери печі; виявлено, що 1 балона недостатньо для необхідного тиску на пальниках; простежуване надмірне охолодження пропан-бутанової суміші, тому перероблено систему подання газу так, щоб одночасно застосовувати два газові балони;

- згідно з рис. 4.24, два газові пальники здатні увідповіднити температурний режим у камері печі зі «стандартним» [2]; можна було збільшити інтенсивність подання палива та підвищити температуру на 61 хвилині експерименту;

- балони заправлені по 35 л газу, чого цілком достатньо для повноцінних випробувань;

- створено систему ущільнення в місцях з'єднання камери печі та конструктивних елементів установки за допомогою мінераловати, вапняного шнура, світлоповертального теплоізоляційного матеріалу (рис. 4.23);

- для фіксації температури в місцях установки термопар спеціально розроблено й виготовлено прототип модуля аналого-цифрового перетворення (АЦП) сигналу термопар; модуль побудований на базі мікросхеми max. 31855, що дає змогу перетворювати аналоговий цифровий сигнал від 5-ти термопар на цифровий із максимальним значенням температури до 1350 °С; систему необхідно вдосконалити так, щоб був можливим контроль якнайменше 18 термопар;

- незважаючи на заявлені в сертифікатах магнезитових плит граничні температури в 1200 °С, він не витримує тривалого нагріву відповідно до стандартної температурної кривої пожежі, тому їх замінено на листи з нержавної сталі;

- необхідно розробити методику випробувань для кожного елемента будівельних конструкцій окремо, з огляду на конструктивні особливості установки.

4.3. Обґрунтування методик експериментальних досліджень несучих залізобетонних будівельних конструкцій

У межах експерименту створено прототип малогабаритної вогневої установки, що вможливило перевірку досягнення стандартного температурного режиму в камері вогневої печі.

Наступний етап досліджень – розроблення методики експериментальних досліджень теплового впливу пожежі окремо для кожного виду фрагментів елементів залізобетонних будівельних конструкцій у малогабаритній установці.

4.3.1. Методика випробування несучих і самонесучих стін. Метод дає змогу отримати експериментальні дані в разі одностороннього нагрівання елемента залізобетонної стіни за стандартною температурною кривою пожежі в компактній вогневій печі без механічного навантаження. Розрахунковим способом можливо оцінити межу вогнестійкості повнорозмірної конструкції за несучою здатністю.

Експеримент проводять на основі стандартів із вогневих випробувань стін на вогнестійкість (ДСТУ Б В.1.1-19-2007 «Захист від пожежі. Несучі стіни. Метод випробування на вогнестійкість» [32]; стандарт із випробувань на вогнестійкість ДСТУ Б В.1.1-4-98 «Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги» [2]).

Конструкцію зразка, спосіб спирання та закріплення на елементах печі, величину й схему навантаження зразка під час випробувань визначають відповідно до розробленої методики. Експериментальні дані є вихідними для проведення розрахунку на міцність конструкцій в умовах пожежі, вони мають повністю задовольняти необхідні вхідні умови.

Розроблено опис і креслення, розрахункові схеми, величини навантажень і зусиль у конструкції стіни, вогнестійкість якої потрібно оцінювати, опис та технічні рисунки зразка, який моделює конструкцію. Обов'язково потрібно аналізувати схему розташування та характеристики арматури, величину захисного

шару арматури й інші дані, що позначаються на вогнестійкості конструкції; перелік використаних матеріалів та основні характеристики; схему спирання і кріплення зразка в печі (граничні умови) [32].

Для оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних стін за результатами вогневих випробувань їхніх компактних елементів необхідно зважати на показники термопар у кожен хвилину випробувань, згідно зі схемою на рис. 4.25.

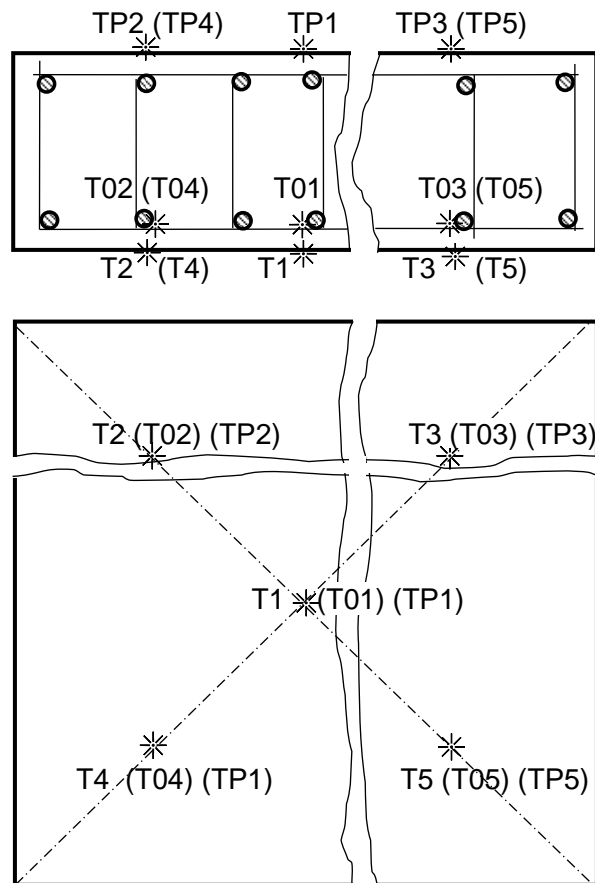


Рисунок 4.25 – Схема розташування термопар у перерізі залізобетонної стіни-зразка для випробувань

На схемі рис. 4.25 представлено місця розташування термопар у проєкційному зв'язку, з огляду на видимість у проєкціях під час дослідження теплового впливу пожежі на несучу стіну.

Термопари розміщені на обігрівальній, необігрівальній поверхнях та на рівні арматури, як зазначено на рис. 4.25: T1-T5 – термопари, розташовані на обігрівальній поверхні залізобетонної конструкції; T01-T05 – термопари, розміщені на рівні арматури досліджуваного зразка з обігрівальної сторони; TP1-

TP5 – термопари (можлива заміна на терморезистори, у разі достатньої точності останніх) розміщені на необігрівальній поверхні зразка.

На рис. 4.26 подано загальну схему армування зразка, що буде встановлений у випробувальну піч.

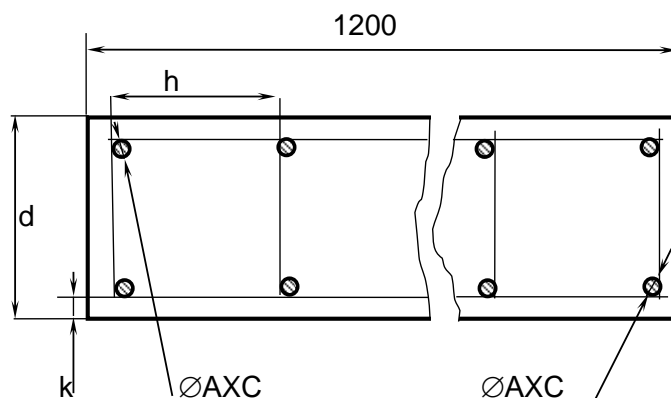


Рисунок 4.26 – Геометричні параметри та схема армування перерізу фрагмента залізобетонної стіни-зразка для випробувань

На рис. 4.26 продемонстровано основні дані щодо армування конструкції. У протоколах (звітах) випробувань необхідно зафіксувати такі дані:

1. d – товщина досліджуваної стіни;
2. k – товщина захисного шару арматури;
3. h – крок арматури;
4. АХС – клас міцності арматури;
5. діаметр арматури;
6. клас міцності бетону;
7. тип крупного заповнювача бетону;
8. габаритні розміри конструкції: ширина й висота стіни, вогнестійкість якої оцінюють, має бути не меншою за 1200 мм (рис. 4.26), для щільного прилягання конструкції до печі та запобігання виходу пічних газів зі сторони стіни.

У зв'язку з порівняно невеликими габаритами будівельної конструкції, навантаження не прикладене, але на це потрібно зважати на етапі розрахунків та математичного моделювання.

На рис. 4.27 представлено схему встановлення стіни для проведення експериментальних досліджень.

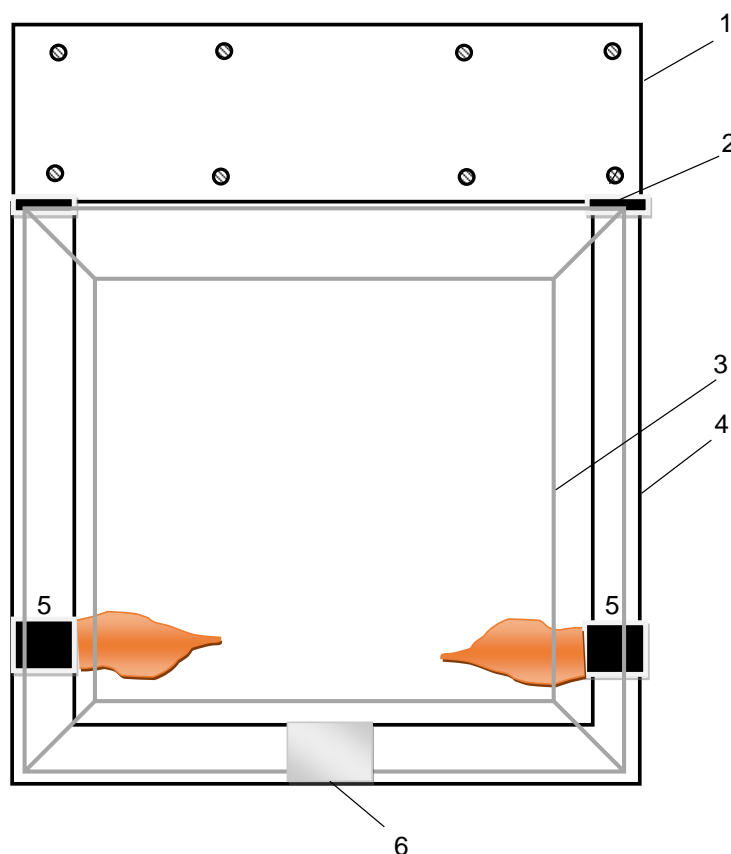


Рисунок 4.27 – Загальна схема встановлення фрагмента залізобетонної стіни-зразка для випробувань у компактну вогневу піч: 1 – досліджуваний зразок; 2 – ущільнювач; 3 – кришка, що закриває верхню частину установки; 4 – огороження печі; 5 – пальники; 6 – отвір виходу продуктів горіння.

Оскільки випробування заплановано проводити за стандартним температурним режимом пожежі, то температура в печі під час випробування має йому відповідати та контролюватися оператором. За необхідності збільшується чи зменшується подання палива.

Засоби вимірювальної техніки й характеристики установки для випробувань описано в розділі 4.1.

За результатами вогневих випробувань складають звіт (протокол), де фіксують дані щодо температури в засобах вимірювальної техніки на кожній хвилині випробувань.

Далі необхідно провести інтерполяцію за даними термопар, що встановлені в ході експериментальних досліджень, а також відновити температурне поле. За його допомогою оцінюють вогнестійкість досліджуваної стіни.

4.3.2. Методика випробування несучих залізобетонних плит. Метод дає змогу отримати експериментальні дані про температурний вплив на елемент залізобетонної плити, аналогічно до стінових елементів, за стандартною температурною кривою пожежі в компактній вогневій печі без механічного навантаження. На підставі цих даних через розрахунок можна оцінити межу вогнестійкості повнорозмірної конструкції щодо несучої здатності. Плити розміщені горизонтально на верхній частині установки, на відміну від стін, що приставлені ззовні. Кришкою закривають передню частину камери.

Для створення температурного режиму пожежі в камері печі передбачають інші, порівняно з нагріванням стінових елементів, місця розташування пальників. Використовують місця в нижній частині камери печі.

Експеримент проведено на основі стандартів із вогневих випробувань стін на вогнестійкість (ДСТУ Б В.1.1-20:2007 «Захист від пожежі. Перекриття та покриття. Метод випробувань на вогнестійкість» [33]; стандарт із випробувань на вогнестійкість ДСТУ Б В.1.1-4-98 «Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги» [2]).

Конструкцію зразка, спосіб спирання і закріплення на елементах печі, величину та схему навантаження зразка в ході випробувань визначають відповідно до розробленої методики. Експериментальні дані є вихідними для розрахунку температурних полів і подальшої апроксимації результатів на конструкцію реальних розмірів, вони мають повністю задовольняти необхідні вхідні умови.

Розроблено опис і креслення, розрахункові схеми, величини навантажень та зусиль у конструкції плити, вогнестійкість якої потрібно оцінити. Необхідні опис і технічні рисунки зразка, що моделює конструкцію, де повинні бути зазначені схема розташування й характеристики арматури, величина захисного шару арматури та інші дані, що позначаються на вогнестійкості конструкції; перелік використаних матеріалів та їхні основні характеристики; схема спірання та кріплення зразка в печі (граничні умови) [33].

Для оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних плит за результатами вогневих випробувань їхніх компактних елементів необхідні показники термопар у кожену хвилину випробувань, згідно зі схемою на рис. 4.28.

На схемі рис. 4.28 зображено точки розташування термопар у проєкційному зв'язку, з огляду на їхню видимість у проєкціях.

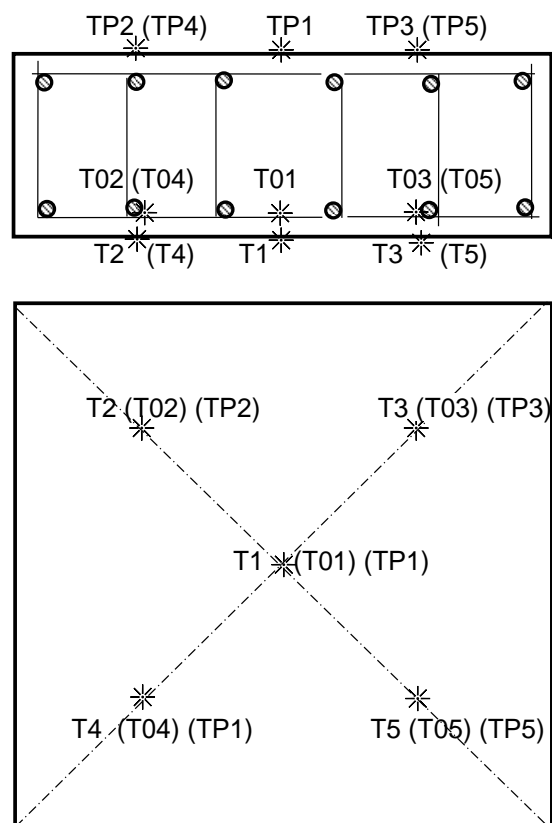


Рисунок 4.28 – Схема розташування термопар у перерізі залізобетонної плити-зразка для випробувань

Термопари розміщені на обігрівальній, необігрівальній поверхнях та на рівні арматури, як представлено на рис. 4.28: T1-T5 – термопари, розташовані на

обігрівальній поверхні конструкції; T01-T05 – термопари, розміщені на рівні арматури досліджуваного зразка з обігрівальної сторони; TP1-TP5 – термопари (можлива заміна на терморезистори, у разі достатньої точності останніх), розміщені на необігрівальній поверхні зразка.

На рис. 4.29 продемонстровано загальну схему армування зразка, що буде встановлений у випробувальну піч.

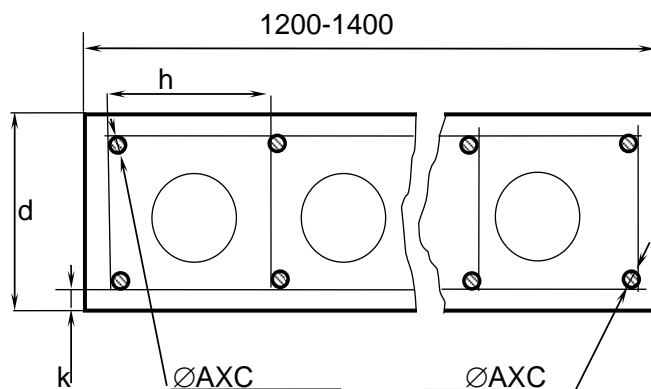


Рисунок 4.29 – Геометричні параметри та схема армування перерізу фрагмента залізобетонної плити-зразка для випробувань

На рис. 4.29 подано основні відомості щодо армування конструкції. У протоколах (звітах) випробувань необхідно фіксувати такі дані:

1. d – товщина досліджуваної плити;
2. k – товщина захисного шару арматури;
3. h – крок арматури;
4. АХС – клас міцності арматури;
5. діаметр арматури;
6. клас міцності бетону;
7. тип крупного заповнювача бетону;
8. габаритні розміри конструкції: ширина й довжина плити, вогнестійкість якої оцінюють, має бути не меншою за 1200 мм (рис. 3.20), для щільного прилягання конструкції до печі та запобігання виходу пічних газів зі сторони плити.

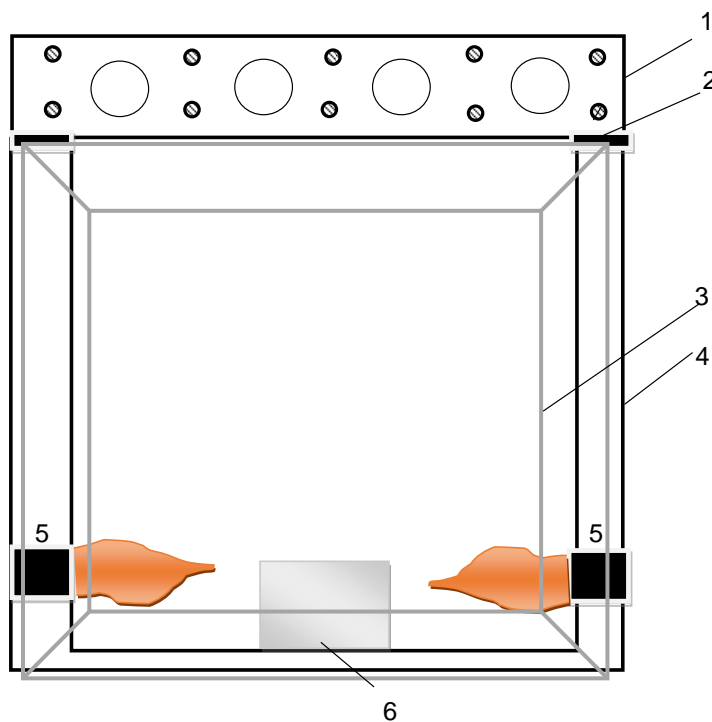


Рисунок 4.30 – Загальна схема встановлення фрагмента залізобетонної (сталезалізобетонної) плити-зразка для випробувань у компакту вогневу піч: 1 – досліджуваний зразок; 2 – ущільнювач; 3 – кришка, що закриває бічну частину установки; 4 – огороження печі; 5 – пальники; 6 – отвір виходу продуктів горіння

У зв'язку з порівняно невеликими габаритами будівельної конструкції, навантаження не прикладене, але це має бути взято до уваги на етапі розрахунків і математичного моделювання.

На рис. 4.30 запропоновано схему встановлення плити для проведення експериментальних досліджень.

Оскільки випробування заплановано проводити за стандартним температурним режимом пожежі, то температура в печі під час випробування має йому відповідати та контролюватися оператором. За необхідності збільшується чи зменшується подання палива.

Засоби виміральної техніки й характеристики установки для випробувань описано в розділі 4.1.

За результатами вогневих випробувань складають звіт (протокол), де фіксують дані щодо температури в засобах вимірювальної техніки на кожній хвилині випробувань.

Далі необхідно провести інтерполяцію за даними термопар, що встановлені під час експериментальних досліджень, і відновити температурне поле. За його допомогою оцінюють вогнестійкість досліджуваної стіни.

4.3.3. Методика випробування несучих залізобетонних колон. Метод дає змогу отримати експериментальні дані про температурний вплив на елемент залізобетонної колони за стандартною температурною кривою пожежі в компактній вогневій печі без механічного навантаження. На підставі даних можливо оцінити розрахунковим способом межу вогнестійкості повнорозмірної конструкції за несучою здатністю. Колони розміщені вертикально в центральній частині установки.

Експеримент проводять на основі стандартів із вогневих випробувань стін на вогнестійкість (ДСТУ Б В.1.1-14:2007 «Захист від пожежі. Колони. Метод випробувань на вогнестійкість» [34]), із випробувань на вогнестійкість (ДСТУ Б В.1.1-4-98 «Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги» [2]).

Конструкцію зразка, спосіб спирання й закріплення на елементах печі, величину та схему навантаження зразка в ході випробувань визначають відповідно до розробленої методики. Експериментальні дані є вихідними для розрахунку, мають повністю задовольняти необхідні вхідні умови.

Розроблено опис і креслення, розрахункові схеми, величини навантажень та зусиль у конструкції фрагмента колони, вогнестійкість якої потрібно оцінити. Потрібні опис і технічні рисунки зразка, що моделює конструкцію, де мають бути зазначені схема розташування й характеристики арматури, величина захисного шару арматури та інші дані, що позначаються на вогнестійкості конструкції; перелік використаних матеріалів та їхні основні характеристики; схема спирання та кріплення зразка в печі (граничні умови) [34].

Для оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних колон за результатами вогневих випробувань їхніх компактних елементів необхідні показники термопар у кожену хвилину випробувань, згідно зі схемою на рис. 4.31.

На схемі рис. 4.31 зображено точки розташування термопар у проєкційному зв'язку, з огляду на їхню видимість у проєкціях.

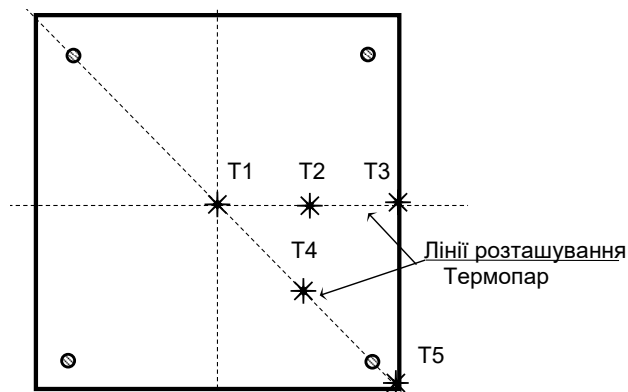


Рисунок 4.31 – Схема розташування термопар у перерізі залізобетонної колони-зразка для випробувань: Т1-Т5 – термопары, розміщені у фрагменті КОЛОНИ

Термопары розміщені на лініях, як зазначено на рис. 4.31.

На рис. 4.32 представлено загальну схему армування зразка, що буде встановлений у випробувальну піч.

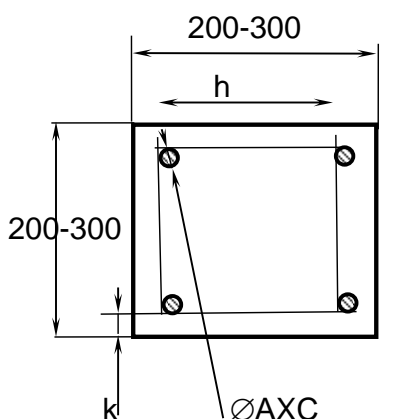


Рисунок 4.32 – Геометричні параметри та схема армування перерізу фрагмента залізобетонної колони-зразка для випробувань

На рис. 4.32 проілюстровано основні дані щодо армування конструкції. У протоколах (звітах) випробувань необхідно зафіксувати такі дані:

1. k – товщина захисного шару арматури;
2. h – крок арматури;
3. АХС – клас міцності арматури;
4. діаметр арматури;
5. клас міцності бетону;
6. тип крупного заповнювача бетону;

7. габаритні розміри конструкції: висота колони, вогнестійкість якої оцінюють, має бути 1000 мм (рис. 4.33), для щільного прилягання конструкції до верхньої кришки за допомогою мінераловати.

У зв'язку з порівняно невеликими габаритами будівельної конструкції, навантаження не прикладене, але це потрібно взяти до уваги на етапі розрахунків і математичного моделювання.

На рис. 4.33 представлено схему встановлення колони для проведення експериментальних досліджень.

Оскільки випробування заплановано проводити за стандартним температурним режимом пожежі, то температура в печі під час випробування має йому відповідати й контролюватися оператором. За необхідності збільшується чи зменшується подання палива.

Засоби вимірювальної техніки й характеристики установки для випробувань описано в розділі 4.1.

За результатами вогневих випробувань складають звіт (протокол), де фіксують дані щодо температури в засобах вимірювальної техніки на кожній хвилині випробувань.

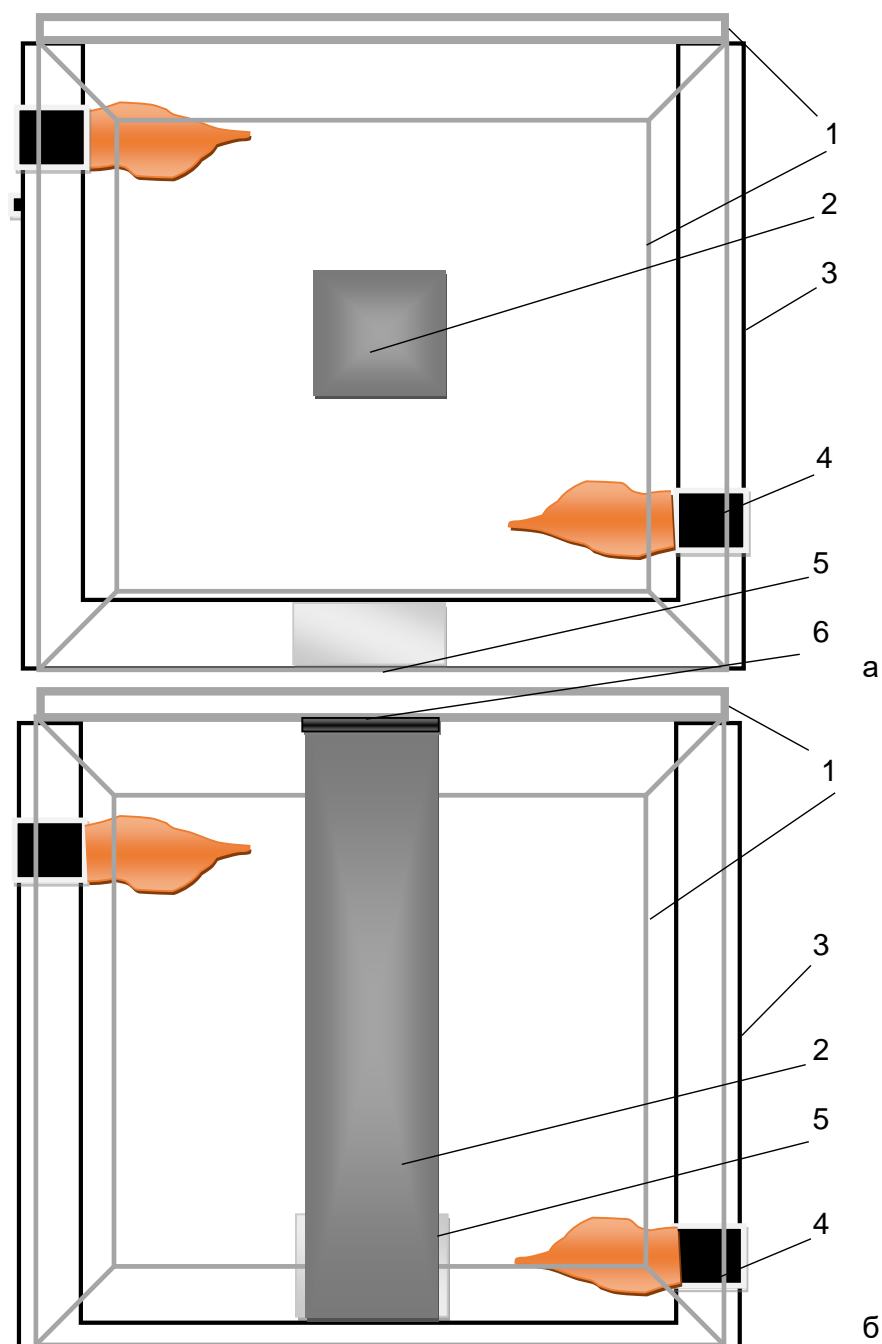


Рисунок 4.33 – Загальна схема встановлення фрагмента колони-зразка для випробувань у компактну вогневу піч (а – вид зверху, б – вид спереду): 1 – кришки, що закривають верхню та бічну частину установки; 2 – досліджуваний зразок; 3 – огороження печі; 4 – пальники; 5 – отвір виходу продуктів горіння; 6 – ущільнювач

Далі необхідно провести інтерполяцію за даними термопар, що встановлені під час експериментальних досліджень, і відновити температурне поле. За його допомогою оцінюють вогнестійкість досліджуваної стіни.

4.3.4. Методика випробування несучих залізобетонних балок. Метод дає змогу отримати експериментальні дані в разі тристороннього нагрівання елемента залізобетонної балки за стандартною температурною кривою пожежі в компактній вогневій печі без механічного навантаження. На підставі цих даних розрахунковим способом можна оцінити межу вогнестійкості повнорозмірної конструкції за несучою здатністю. Під час розрахунку передбачено можливу зміну довжини балки й величин навантаження.

Експеримент проведено на основі стандартів із вогневих випробувань балок (ДСТУ Б В.1.1-13:2007. «Захист від пожежі. Балки. Метод випробування на вогнестійкість» [31]) та стандарту з випробувань на вогнестійкість («ДСТУ Б В.1.1-4-98 Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги» [2]).

Конструкцію зразка, спосіб спирання й закріплення на елементах печі, величину та схему навантаження зразка під час випробувань визначають відповідно до розробленої методики. Експериментальні дані є вихідними для розрахунку, мають повністю задовольняти необхідні вхідні умови.

Передня та верхня частина камери печі закриті кришками. Балка має нагріватися з трьох сторін, тому одна сторона повинна примикати до кришки. Як ущільнювач використано мінеральну вату.

Для оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних стін за результатами вогневих випробувань їхніх компактних елементів необхідні показники термопар у кожен хвилину випробувань, згідно зі схемою на рис. 4.34.

На схемі рис. 4.34 зображено точки розташування термопар у середній частині балки, з огляду на їхню видимість у проєкціях. Термопарі потрібно встановити, засвердливши їх ззовні.

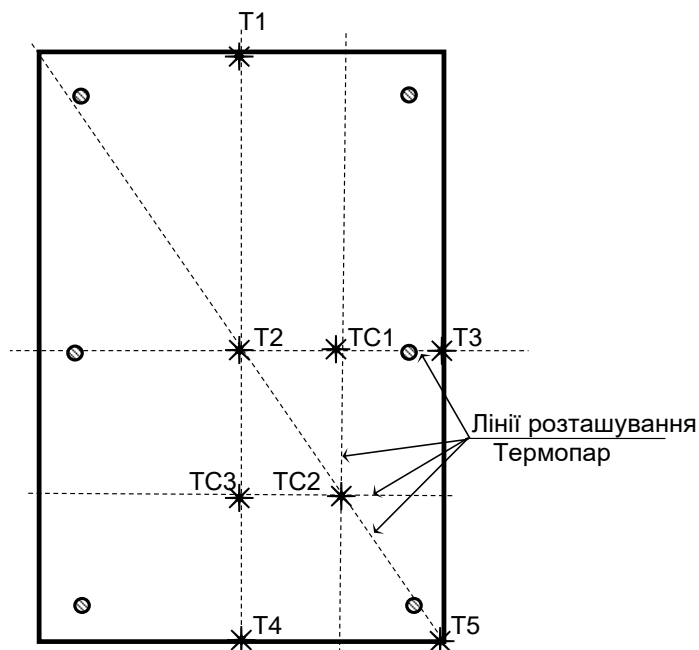


Рисунок 4.34 – Схема розташування термопар у перерізі залізобетонної балки-зразка для випробувань: T1-T5 – термопари, розміщені у фрагменті колони

Для створення температурного режиму пожежі в камері печі передбачено місця розташування пальників, що розміщені в дальній частині камери. Використано місця в нижній частині камери печі.

Розроблено опис і креслення, розрахункові схеми, величини навантажень та зусиль у конструкції стіни, вогнестійкість якої оцінюють. Необхідні опис і технічні рисунки зразка, що моделює конструкцію, де повинні бути зазначені схема розташування й характеристики арматури, величина захисного шару арматури та інші дані, що позначаються на вогнестійкості конструкції; перелік використаних матеріалів і їхні основні характеристики; схема спирання та кріплення зразка в печі (граничні умови) [31].

Термопари розміщено на лініях, як зазначено на рис. 4.34. Для розташування термопар, відповідно до розробленої схеми, можна передбачити жолоби під час виготовлення фрагмента або точно засвердлення після застигання виробу, за дотримання описаних вище умов.

На рис. 4.35 подано загальну схему армування зразка, що буде встановлена у випробувальну піч.

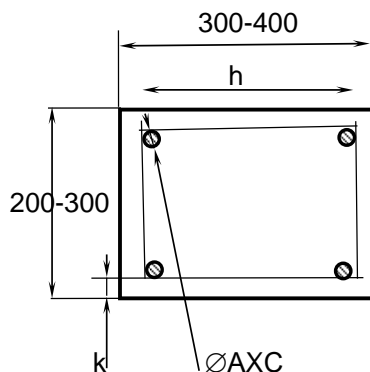


Рисунок 4.35 – Геометричні параметри та схема армування перерізу фрагмента залізобетонної балки-зразка для випробувань

На рис. 4.35 продемонстровано основні дані щодо армування конструкції. У протоколах (звітах) випробувань необхідно зафіксувати дані:

1. k – товщина захисного шару арматури;
2. h – крок арматури;
3. АХС – клас міцності арматури;
4. діаметр арматури;
5. клас міцності бетону;
6. тип крупного заповнювача бетону;
7. габаритні розміри конструкції: висота балки, вогнестійкість якої оцінюють, має бути 1000 мм (рис. 3.27), для щільного прилягання конструкції до верхньої кришки за допомогою мінераловати. У зв'язку з порівняно невеликими габаритами будівельної конструкції, навантаження не прикладене, але це варто взяти до уваги на етапі розрахунків і математичного моделювання.

На рис. 4.36 подано схему встановлення балки для проведення експериментальних досліджень.

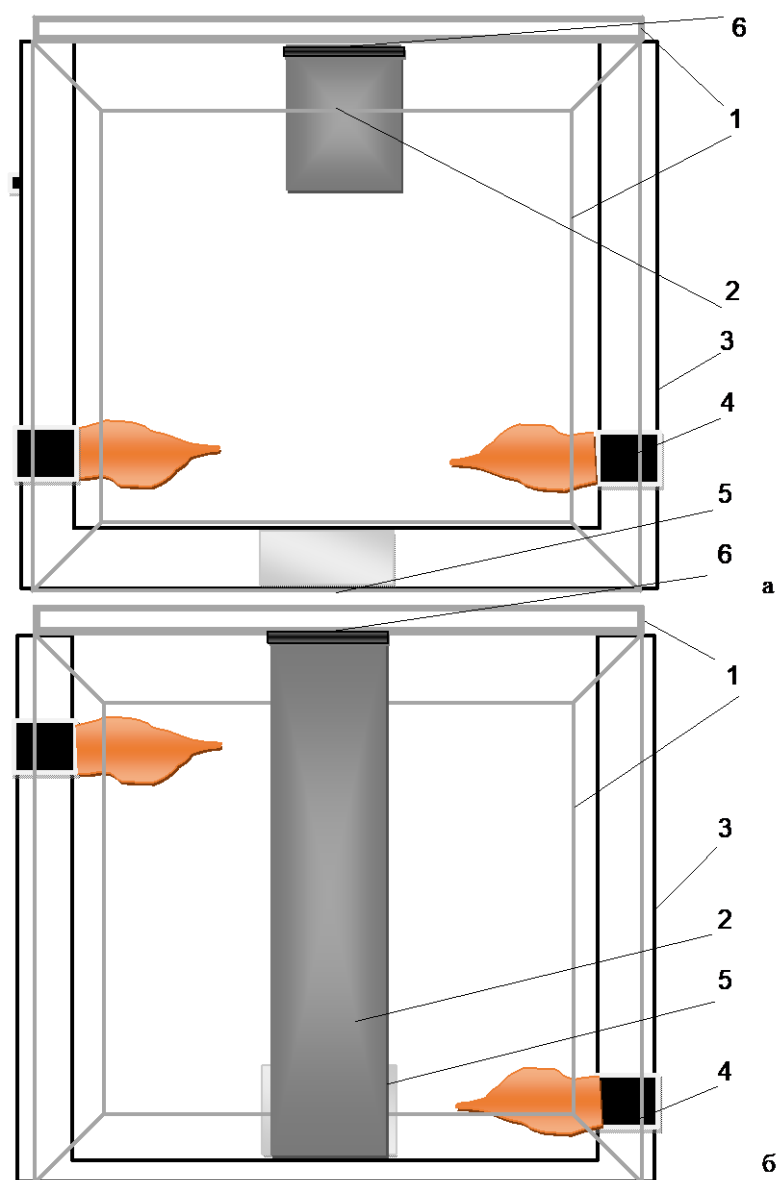


Рисунок 4.36 – Загальна схема встановлення фрагмента колони-зразка для випробувань у компактну вогневу піч (а – вид зверху, б – вид спереду): 1 – кришки, що закривають верхню та бічну частину установки; 2 – досліджуваний зразок; 3 – огороження печі; 4 – пальники; 5 – отвір виходу продуктів горіння; 6 – ущільнювач

Оскільки випробування заплановано проводити за стандартним температурним режимом пожежі, то температура в печі під час випробування має йому відповідати й контролюватися оператором. За необхідності збільшується чи зменшується подання палива.

Засоби вимірювальної техніки й характеристики установки для випробувань описано в розділі 4.1.

За результатами вогневих випробувань складють звіт (протокол), де фіксують дані щодо температури в засобах вимірювальної техніки на кожній хвилині випробувань.

Далі необхідно провести інтерполяцію за даними термопар, що встановлені під час експериментальних досліджень, і відновити температурне поле. За його допомогою оцінюють вогнестійкість досліджуваної конструкції.

Висновки до розділу 4

На основі отриманих даних створено ескіз і побудовано реальну установку для проведення експериментальної частини загальної системи оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій під впливом стандартного температурного режиму пожежі. Доведено, що реальна установка здатна забезпечити умови нагрівання за стандартним температурним режимом пожежі та високий ступінь відтворюваності експериментальних даних.

У камері вогневої печі передбачено чотири отвори для пальників (у ході експерименту використано лише два з чотирьох; два інші закриті мінеральною ватою, що ізолює надходження повітря ззовні та вихід димових газів і тепла зсередини), а також один отвір для виходу продуктів горіння. Стінки камери виконано з шамотної цегли товщиною 230 мм, що достатньо для зниження тепловіддачі в навколишнє середовище. Для закривання печі з верхньої та передньої сторони створено спеціальні кришки, виконані з металевого каркасу, мінеральної вати й магнезиту (його замінено на сталеві листи після тестових запусків).

Вибрано та обґрунтовано раціональне місце й основні матеріали для побудови установки, що дало змогу під'єднатися до димоходу. Місце вибрано безпосередньо близько до води та електроенергії. Описано процес будівництва й під'єднання елементів установки. Пальники знімні, що вможливило зміну їхнього

місця розташування залежно від виду фрагмента елемента будівельної конструкції.

Проведено тестові запуски печі, проаналізовано результати, а також удосконалено конструктивні елементи установки на основі отриманих даних. За результатами тестового запуску № 1, закріплено магnezитові листи в середній частині для запобігання прогинанню. Для кращої герметизації камери печі в місцях прилягання кришок до стінок камери, крім мінераловати, застосовано вапняний шнур. Перероблено систему подання газу так, щоб одночасно застосовувати два газові балони, для запобігання надмірному охолодженню пропан-бутанової суміші й забезпечення необхідного тиску на пальниках. Змінено розміщення термопар, для контролю температури в усій камері, а не лише у верхній її частині.

За результатами тестового запуску № 2, замінено магnezитові листи на листи з нержавної сталі. Для кращої герметизації камери печі в місцях прилягання кришок до стінок камери, крім мінераловати й вапняного шнура, застосовано світлоповертальний теплоізоляційний матеріал. Систему подання газу та розміщення термопар залишено без змін.

За результатами тестового запуску № 3, не зафіксовано виділення димових газів з-під кришок печі протягом усього експерименту. Крім того, температурний режим у камері печі відповідав стандартному та був рівномірним по всій камері печі.

Після налагодження стабільної роботи установки, появи можливості відтворення в ній стандартного температурного режиму пожежі, розроблено методику проведення експериментів для дослідження теплового впливу пожежі на основні елементи будівельних конструкцій (кожного окремо). Визначено види, місця розташування вимірювальної арматури. Для фіксації цифрових значень температури в місцях установки термопари спеціально розроблено й виготовлено прототип модуля аналого-цифрового перетворення (АЦП) сигналу термопари. Модуль побудований на базі мікросхеми тах. 31855, що дає змогу перетворювати

аналоговий цифровий сигнал від 18 термопар на цифровий із максимальним значенням температури до 1350 °С.

Створено передумови для подальших досліджень, суть яких полягає в проведенні вогневих випробувань фрагментів елементів залізобетонних будівельних конструкцій. За результатами складають звіт (протокол), де фіксують дані щодо температури в засобах вимірювальної техніки на кожній хвилині випробувань. Далі необхідно провести інтерполяцію за даними термопар, що встановлені під час експериментальних досліджень, і відновити температурне поле (відповідно до методик, проаналізованих у розділі 2). На основі отриманої інформації оцінюють вогнестійкість досліджуваної конструкції за допомогою розрахункових методів.

РОЗДІЛ 5

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕПЛОВОГО ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ НА ФРАГМЕНТИ ЕЛЕМЕНТІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

5.1. Результати експериментальних досліджень із нагрівання фрагментів залізобетонних стін

5.1.1. Об'єкти випробування. Фрагменти залізобетонної стіни номінальним розміром 1200×1200 мм були виготовлені заздалегідь до випробування. Рецептуру виготовлення зразку взято з [136] з метою створення можливості порівняння отриманих результатів з опублікованими раніше.

Пропорції фрагмента: на 1 м^3 – портландцемент марки «500» – 460 ± 10 кг; пісок кварцовий – 660 ± 10 кг; щебінь гранітний – 1150 ± 10 кг; вода.

Армування увідповіднене з вимогами до будівництва конструкцій стін сучасних житлових будинків із монолітного залізобетону. Арматура – дріт класу Вр-І діаметром 5 мм.

Водо-цементне (В/Ц) співвідношення: $V/C = 0,3 \times$ (вода – 138 ± 10 кг); з однаковими фракціями гранітного заповнювача (щебня) – 10–20 мм.

Складники дозовані за допомогою вагових дозаторів заводського виконання. Бетонну суміш перемішано в бетономішалці вільного падіння об'ємом $0,75 \text{ м}^3$. Ущільнення бетонної суміші реалізоване з використанням глибинних вібраторів.

Конструкцію виготовлено за допомогою стандартної розбірної опалубки. Зразки перебували в опалубці протягом семи днів. Після розпалубки фрагмент і допоміжні зразки зберігалися впродовж 28 діб.

Після 28-денного витримування фрагменти зберігали в нормальних умовах температури й вологості до початку випробувань.

На рис. 1 подано фото задалегідь підготовленого фрагмента, зразка № 1, для натурального випробування з вогнестійкості.



Рисунок 5.1 – Малогабаритний фрагмент залізобетонної стіни, виготовленої задалегідь до випробування: а – місце виготовлення та зберігання фрагментів залізобетонної стіни; б – фрагмент стіни, установлений у вогневу піч до початку запуску; 1 – огороження вогневої печі; 2 – фрагмент залізобетонної стіни для випробування

Згідно з рисунком 5.1, зразки зберігалися в закритому приміщенні, потім їх транспортували до місця випробувань і встановлювали у вогневу піч.

5.1.2. Нормативна база. Для випробувань використано метод, що увідповіднений із нормативними документами:

ДСТУ Б В.1.1-4-98*	Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги [2].
ДСТУ Б В.1.1-19:2007	Несучі стіни. Метод випробування на вогнестійкість [32].

ДСТУ 2272:2006	Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять [28].
НАПБ А.01.001-2014	Правила пожежної безпеки в Україні [27].
ДБН В.2.6-98:2009	Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [29].
ДБН В. 1.1.7-2016	Пожежна безпека об'єктів будівництва [1].

5.1.3. Мета випробувань. Мета – отримати результати температурних розподілів на поверхні та в точках інтегрування в перерізах фрагментів залізобетонних стін для подальшого розрахункового оцінювання їхньої межі вогнестійкості; перевірка відтворюваності експериментальних даних.

5.1.4. Місце та умови проведення випробувань. Навчальний комплекс практичної підготовки фахівців Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту ЧСПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України (с. Свидівок Черкаського району Черкаської області). Зовнішні умови:

– дата проведення випробувань –	05.08.2021;
– температура повітря –	26 ⁺¹ °C;
– вологість повітря –	58 %;
– вітер північний –	1-3 м/с.

5.1.5. Методика випробувань. Загальну методику проведення випробувань у компактній вогневій печі без механічного навантаження описано в розділі 4.2.1. Методика полягає у впливі стандартного температурного режиму пожежі за одностороннього нагрівання елемента залізобетонної стіни. На основі отриманих даних розрахунковим способом можна оцінити межу вогнестійкості повнорозмірної конструкції.

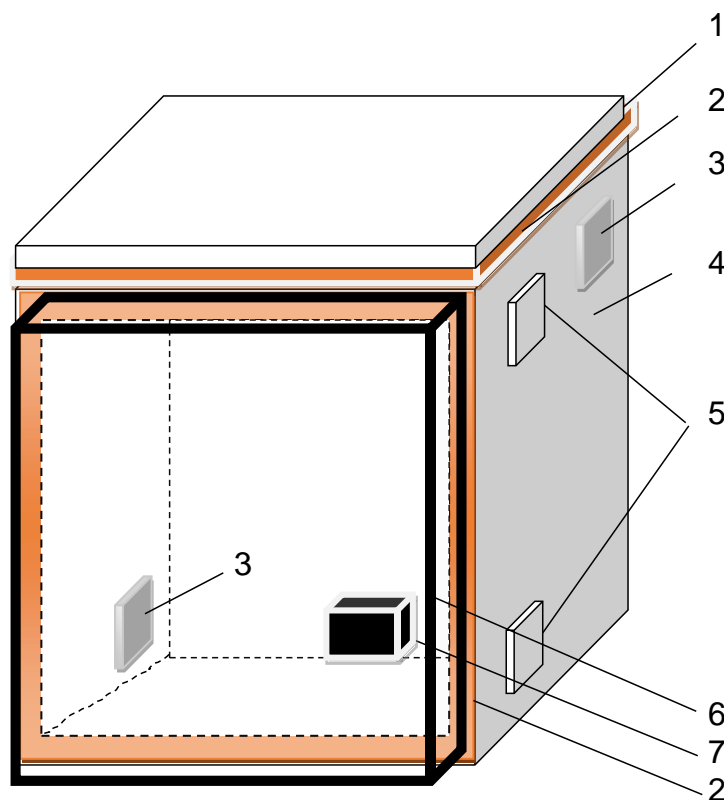


Рисунок 5.2 – Схема встановлення зразка для випробувань: 1 – кришка, що закриває верхню частину установки; 2 – ущільнювач із мінеральної вати й вапняного шнура; 3 – пальники, що створюють температурний режим у камері печі; 4 – огороження печі; 5 – місця для пальників, що не використовують під час вогневих випробувань стін; 6 – досліджуваний зразок; 7 – отвір виходу продуктів горіння

До початку випробування зафіксовано дату проведення дослідження, температуру навколишнього повітря, вологість повітря, силу й напрям вітру (розділ 5.1.5). Перед початком замірено габаритні розміри зразка, товщину зразка. Зафіксовано встановлені дані. Виготовлено три зразки:

- зразок 1 – 1193 × 1195 мм;
- зразок 2 – 1198 × 1194 мм;
- зразок 3 – 1201 × 1199 мм.

Зразок для випробувань закріплено в передній частині установки. Верхня частина установки закрита кришкою. Для щільності прилягання використано мінеральну вату й вапняний шнур. На рис. 5.2 зображено схему встановлення зразка для випробувань.

У процесі випробування стін використано два пальники, що розташовані зверху та знизу дальньої частини установки. Факели полум'я розміщені на 80 см до випробувального зразка (рис. 5.2). На час випробувань стіни місця для пальників, які не використовували, закладені цеглою і мінеральною ватою для запобігання виходу пічних газів через отвори.

5.1.6. Засоби вимірювальної техніки. До початку випробувань встановлено термомпари в просторі камери вогневої печі та на зразку:

- у камері вогневої печі розташовані три термомпари типу ТХА для контролю температурного режиму та його увідповіднення зі стандартним;
- на обігрівальній поверхні зразка та на рівні арматури по 5 термомпар (рис. 5.3);
- на необігрівальній поверхні 5 терморезисторів із діапазоном замірювання 0 – 300 °С.

Відповідно до розроблених методик, засоби вимірювальної техніки, мають бути встановлені до випробувань. Особливістю одностороннього обігріву є те, що необхідно враховувати всі три показники вогнестійкості.

Тому необхідно замірювати температуру на необігрівальній стороні щонайменше у п'яти розосереджених місцях.

Щодо цілісності. У випадку випробування фрагментів можливе проведення візуального спостереження, тому при будь-яких тріщинах на поверхні доцільним є вважати, що вона порушена.

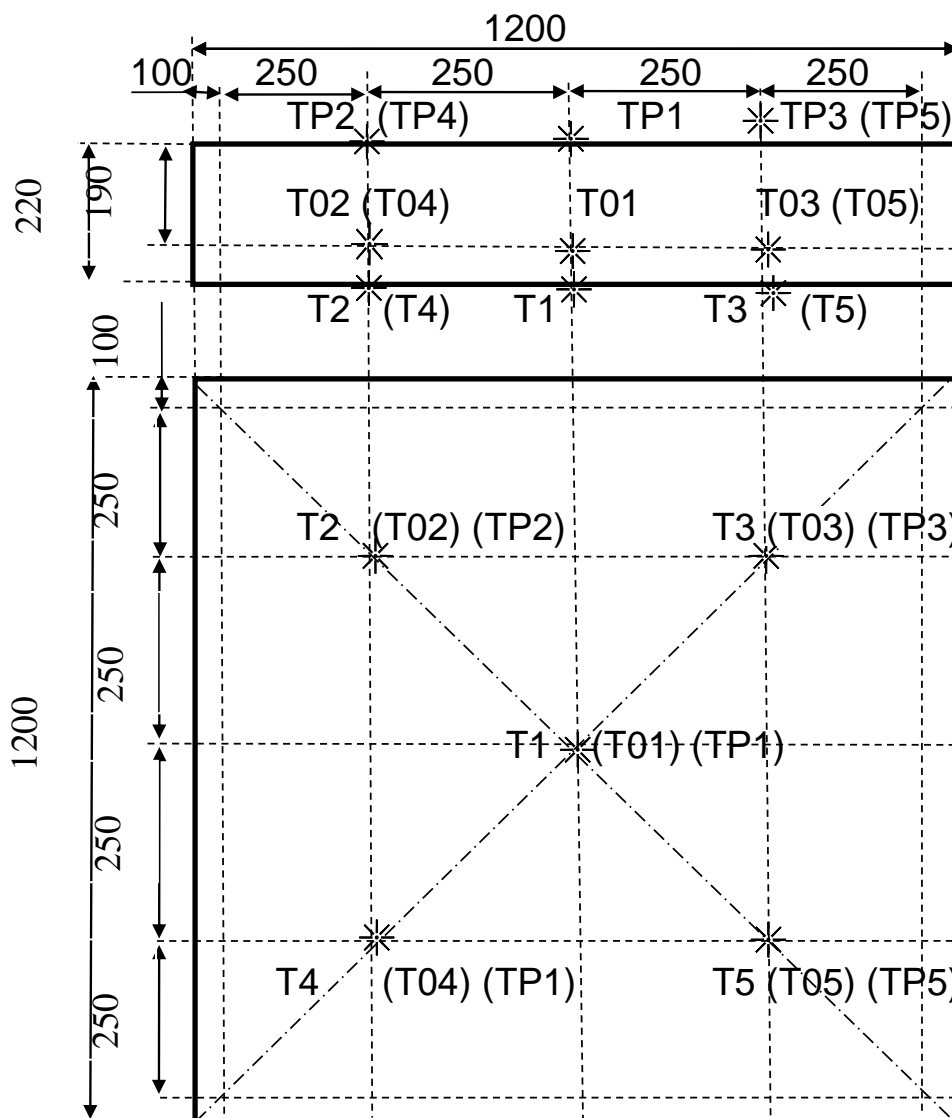


Рисунок 5.3 – Схема розташування засобів вимірювальної техніки в перерізі залізобетонної стіни-зразка для випробувань

Згідно з рис. 5.3, засоби вимірювальної техніки, встановлені до випробувань, розташовані та пронумеровані так: на обігрівній поверхні зразка – термомпари T1 – T5; на необігрівній поверхні – терморезистори TP1 – TP5; термомпари T01 – T05 на рівні арматури (0,03 м від поверхні).

У таблиці 5.1 систематизовано використані під час натурального експерименту засоби вимірювальної техніки.

Засоби вимірювальної техніки

№ з/п	Найменування обладнання або приладу	Заводський номер	Діапазон вимірювання	Похибка вимірювань
1	2	3	4	5
1	Лінійка вимірювальна	-	від 0 мм до 1000 мм	± 1 мм
2	Секундомір СОС пр-2б-2-000	3401	від 0 с до 60 с, від 0 с до 60 хв	$\pm \left(\frac{0,4}{60} \tau \right)$ $\pm \left(0,4 + \frac{1,5}{3540} (\tau - 60) \right)$
3	Психрометр аспіраційний МВ-4М	14689	від 10 % до 100 % від -10°C до 50°C	± 4 % ± 0,2 °C
4	Штангенциркуль ШЦ-1	3339340	від 0 мм до 125 мм	± 0,1 мм
5	Барометр-анероїд М67	797	600 - 800 мм рт. ст.	± 1 мм рт. ст.
7	Анемометр АСО-3	12952	від 0,3 м/с до 5 м/с	± (0,1+0,05V) м/с
8	Ваги MW-1200	990208057	від 0 кг до 1,2 кг	± 0,05 г
9	Термопара ТХА-2388**	2388 з модулем АЦП	від -200 до +700 °C від +700 до +1350°C	± 2,0 °C ± 4,0 °C
10	Термістор**	MF 52	від -30 до +300°C	± 1,0 %

* – опис інформаційно-вимірювальної системи на базі мікросхеми max. 31855 подано нижче;

** – термопари ТХА – 13 шт., термістори – 5 шт.

Для фіксування температури в печі застосовано термопари ТХА-2388 із діаметром дроту 1,25 мм (рис. 4.4). Їх можна використовувати для вимірювання температури в діапазоні від 0 до 1300 С.

Для вимірювання температури в досліджуваному зразку використано термістори, придатні для вимірювання і температури в діапазоні від -30 до 300 С.

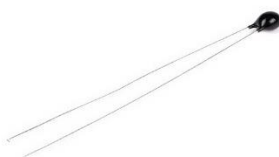


Рисунок 5.4 – Термістор MF 52

Усі аналогово-цифрові перетворювачі сигналу термопар і термісторів розташовані в блоці комбінованого обчислення температур (рис. 5.5)

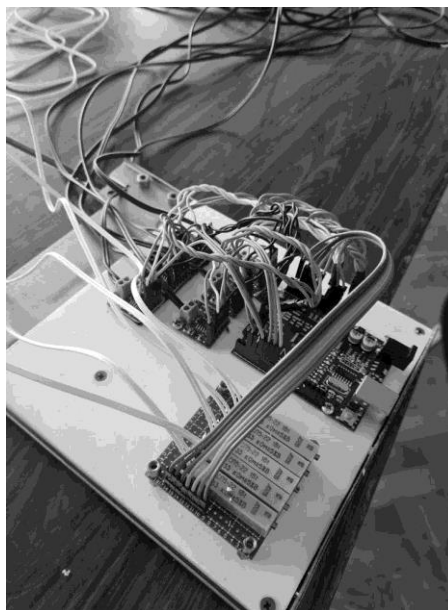


Рисунок 5.5 – Блок комбінованого обчислення температур

Приципову схему блок комбінованого обчислення температур представлено на рис. 5.6.

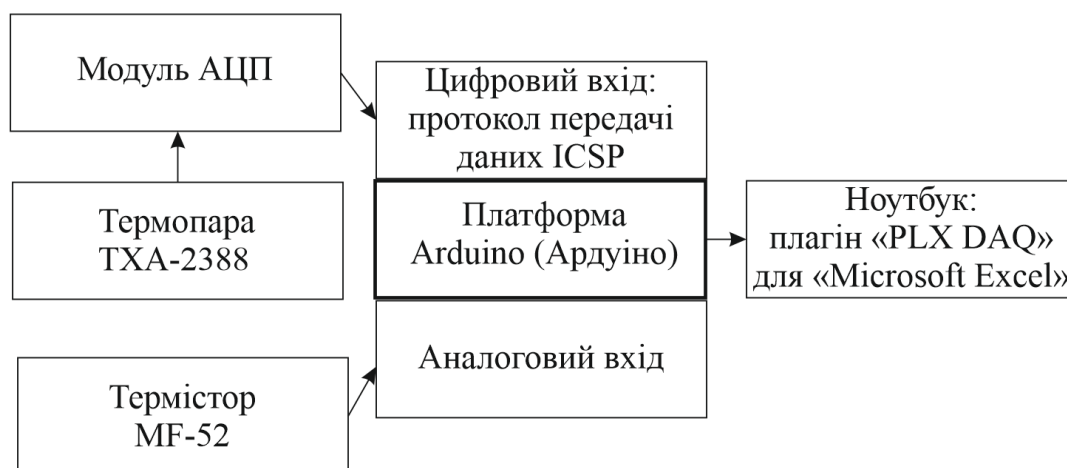


Рисунок 5.6 – Принципова схема блоку комбінованого обчислення температур

Для фіксування цифрових показників температури в місцях установки термопари використано модуль аналого-цифрового перетворення (АЦП) сигналу

термопар на основі мікросхеми max. 31855, що дає змогу перетворювати аналоговий цифровий сигнал термопар на цифровий із максимальним значенням температури до 1350 °С. Модуль передає сигнал на платформу Ардуіно через цифровий вхід. Сигнал від термісторів надходить на аналоговий вхід та паралельно з сигналом від термопар опрацьовується мікропроцесором Ардуіно.

Зображений на рис. 5.5, блок комбінованого обчислення температур спеціально для створеної малогабаритної установки розроблено у ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, допомагає вимірювати температуру з чутливістю 0,25 °С. Цей пистрій зважає на температуру холодних спаїв та автоматично корегує значення температури.

Для опрацювання отриманих відомостей використано плагін «PLX DAQ» для «Microsoft Excel», що дає змогу в реальному часі фіксувати значення температури й будувати графіки.

5.1.7. Хід випробувань. Під час випробувань проведено фотофіксацію і відеофіксацію експерименту.

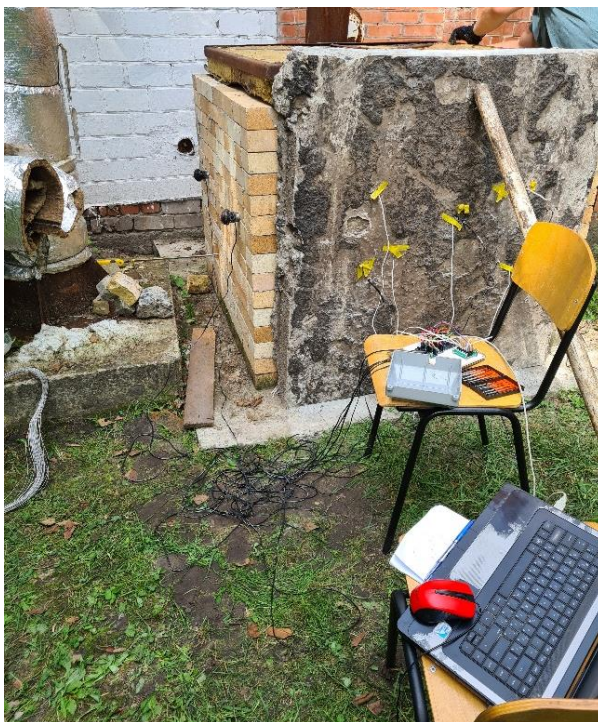


Рисунок 5.7 – Вигляд вогневої печі перед початком випробування

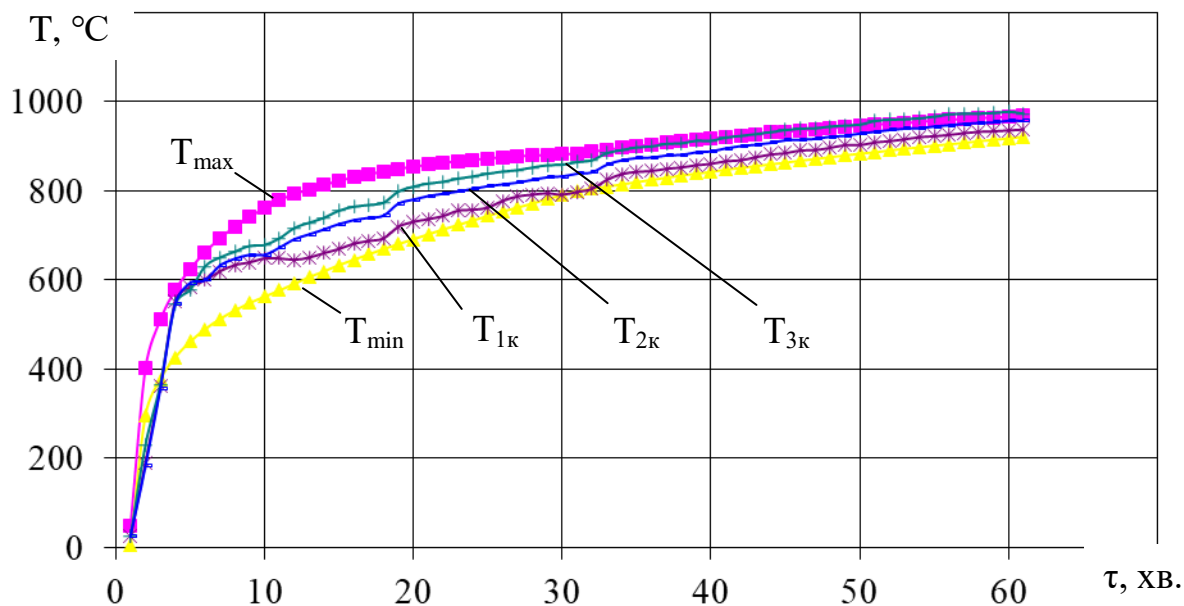


Рисунок 5.8 – Лінійна швидкість нагрівання камери печі під час випробування стіни: T_{\min} , T_{\max} – граничні межі випробувань за стандартним температурним режимом пожежі [2]; $T_{к1}$, $T_{к2}$, $T_{к3}$ – показники термопар у ході вогневих випробувань

Як засвідчують дані прогріву термопар (рис. 5.8), лінійна швидкість нагрівання камери печі увідповіднена зі «стандартною» температурною кривою пожежі, перебуває в стандартних межах [2]. За досягнення 980 С встановлено стаціонарний режим, із використанням регулювання потужності нагрівання печі. Тривалість випробування – 63 хвилини.

На рисунку 5.9 продемонстровано досліджуваний зразок на 30 хвилині випробувань.



Рисунок 5.9 – Малогабаритний фрагмент залізобетонної стіни після випробування

Згідно з рисунком 5.9, під час нагрівання залізобетону розпочався процес деструкції з виділенням вологи й пари, які перебували всередині.

5.1.8. Результати випробувань. Дослідження обмежені 60 хвилинами, оскільки далі температурний режим здатний наблизитися до стаціонарного.

Унаслідок візуального огляду, зафіксовано, що не відбулося втрати цілісності, теплоізоляційної та несучої здатності зразка.

На рисунку 5.10 – 5.12 відображено результати показників термопар на обігрівальній, необігрівальній поверхні та на рівні арматури.

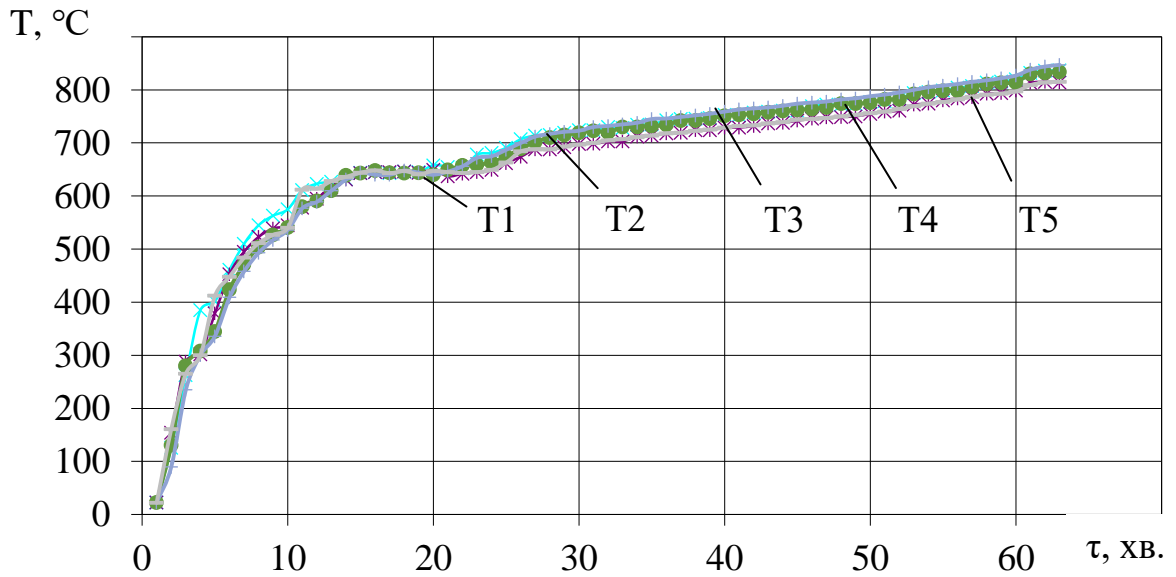


Рисунок 5.10 – Результати вимірювання температури на обігрівальній поверхні досліджуваного зразка: T1-T5 – показники термопар (рис. 5.3)

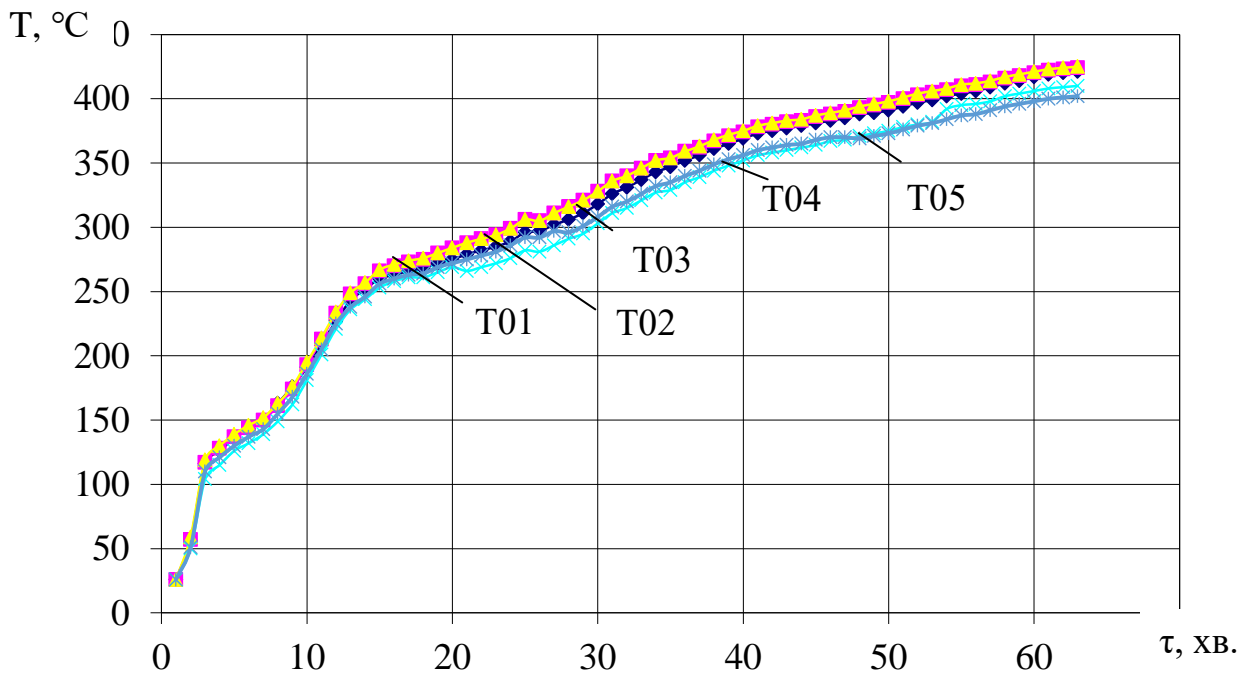


Рисунок 5.11 – Результати вимірювання температури на рівні арматури досліджуваного зразка: T01-T05 – показники термопар (рис. 5.3)

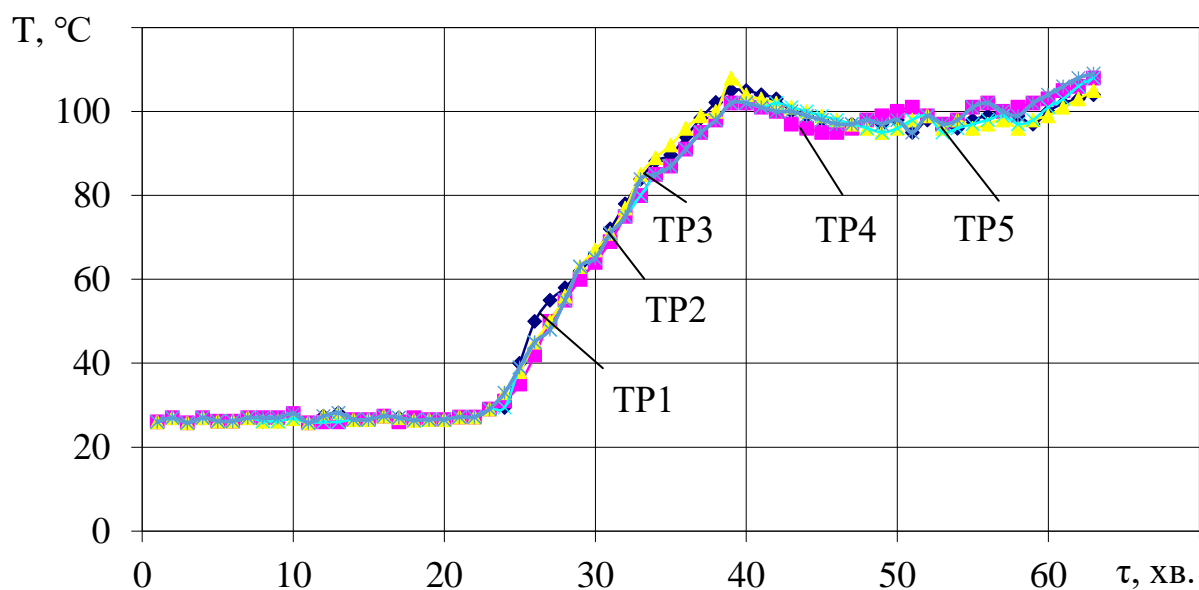


Рисунок 5.12 – Результати вимірювання температури на необігрівальній поверхні досліджуваного зразка: TP1-TP5 – показники термопар (рис. 5.3)

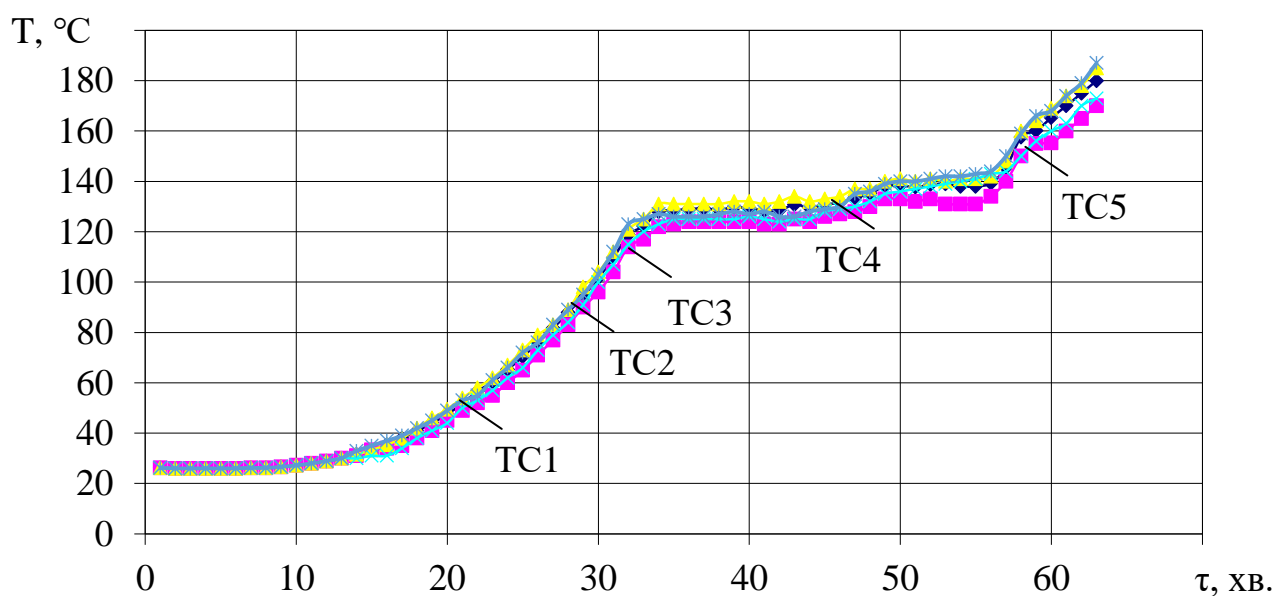


Рисунок 5.13 – Результати вимірювання температури на товщині 110 мм (середина стіни): TC1-TC5 – показники термопар

На підставі аналізу даних, отриманих за результатами експериментів (рис. 5.10 – 5.13), зроблено висновки:

- два газові пальники можуть увідповіднити температурний режим у камері печі зі «стандартним» [2];
- під час нагрівання залізобетону зафіксовано виділення вологи й пари, що були всередині матеріалу: на обігрівальній поверхні процес відбувався з 11 до 27 хвилини (рис. 5.10), на необігрівальній – із 40 до 55 хвилини (рис. 5.11), на рівні арматури – з 32 до 52 хвилини (рис. 5.12);
- виявлено рівномірний прогрів конструкції на всіх рівнях у площинах розміщення термопар (рис 5.10 – 5.13);
- максимальна температура на рівні арматури становила 190 °С, була простежувана на останній хвилині експерименту та лінійно зростала після виходу з плато;
- максимальна температура на необігрівальній поверхні дорівнювала 110 °С, була простежувана на останній хвилині експерименту та лінійно зростала після виходу з плато;
- потрібно верифікувати експериментальні дані для підтвердження їхньої достовірності;
- отриманих експериментальних даних достатньо для подальшого розрахунку температурних полів усередині конструкції та оцінювання вогнестійкості конструкцій.

5.2. Результати експериментальних досліджень із нагрівання фрагментів залізобетонних плит

5.2.1. Об'єкти випробування. Фрагменти без пустотної залізобетонної плити номінальним розміром 1200×1200 мм виготовлені заздалегідь до випробування. Рецептuru виготовлення зразку взято з [136] з метою створення можливості порівняння отриманих результатів з опублікованими раніше.

Пропорції фрагментів (на 1 м³): портландцемент марки «500» – 460± 10 кг; пісок кварцовий – 660 ± 10 кг; щебінь гранітний – 1150 ± 10 кг; вода.

Армування передбачене відповідно до фактично використовуваного на будівництві плит сучасних житлових будинків із монолітного залізобетону. Арматура – дріт класу Вр-І діаметром 5 мм.

Водо-цементне співвідношення: $V/C = 0,36 \times$ (вода – 165 ± 10 кг); з однаковими фракціями гранітного заповнювача (щебня) – 5–10 мм.

Складники дозовані за допомогою вагових дозаторів заводського виконання. Бетонну суміш перемішано в бетономішалці вільного падіння об'ємом $0,75 \text{ м}^3$. Ущільнення бетонної суміші виконане за допомогою глибинних вібраторів. Конструкцію виготовлено за допомогою стандартної розбірної опалубки.

На рис. 5.14 представлено фото заздалегідь підготовленого фрагмента, зразка № 1, для натурального випробування з вогнестійкості.

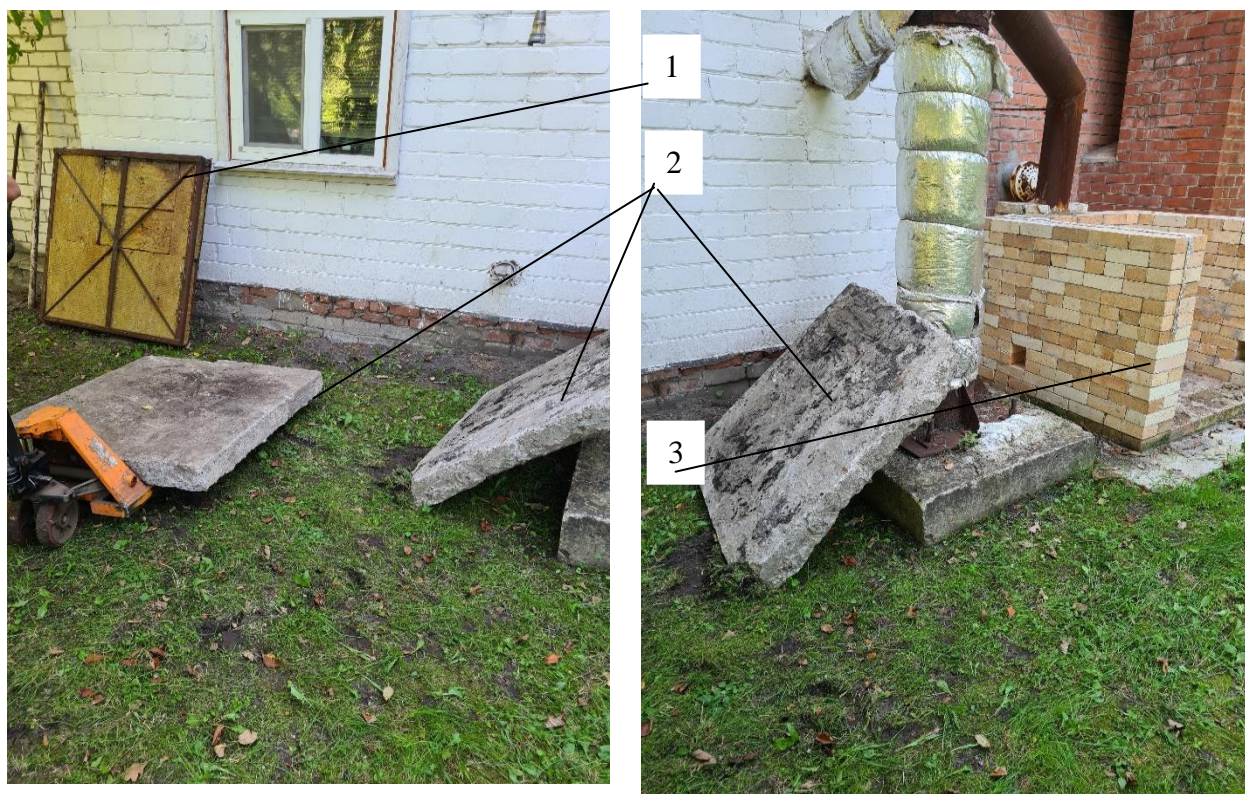


Рисунок 5.14 – Малогабаритний фрагмент залізобетонної плити, виготовленої заздалегідь до випробування: 1 – кришка для закриття камери вогневої печі; 2 – фрагменти залізобетонних стін для випробування; 3 – установка для проведення випробувань.

Згідно з рисунком 5.14, зразки перебували в закритому приміщенні, потім їх транспортували до місця випробувань, встановлюючи у вогневу піч. Зразки зберігали в опалубці протягом семи діб. Після розпалубки фрагмент і допоміжні зразки зберігали впродовж 28 діб. Після 28-денного витримання фрагменти перебували в нормальних умовах температури й вологості до початку випробувань.

5.2.2. Нормативна база. Для проведення випробувань використано метод, згідно з нормативними документами:

ДСТУ Б В.1.1-4-98*	Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги [2].
ДСТУ Б В.1.1-20:2007	Захист від пожежі. Перекриття та покриття. Метод випробувань на вогнестійкість [33].
ДСТУ 2272:2006	Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять [28].
НАПБ А.01.001-2014	Правила пожежної безпеки в Україні [27].
ДБН В.2.6-98:2009	Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [29].
ДБН В. 1.1.7-2016	Пожежна безпека об'єктів будівництва [1].

5.2.3. Мета випробувань. Мета – отримати результати температурних розподілів на поверхні та в точках інтегрування в перерізах фрагментів залізобетонних плит для подальшого розрахункового оцінювання їхньої межі вогнестійкості; перевірка відтворюваності експериментальних даних.

5.2.4. Місце та умови проведення випробувань. Навчальний комплекс практичної підготовки фахівців Оперативно-рятувальної служби цивільного

захисту ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України (с. Свидівок Черкаського району Черкаської області). Зовнішні умови:

- дата проведення випробувань – 09.08.2021;
- температура повітря – 25^{+1} °C;
- вологість повітря – 59 %;
- вітер північний – 1-2 м/с.

5.2.5. Методика випробувань. Загальну методику проведення випробувань у компактній вогневій печі без механічного навантаження описано в розділі 3.5.2. Методика полягає у впливі стандартного температурного режиму пожежі за одностороннього нагрівання елемента залізобетонної плити. На основі отриманих відомостей розрахунковим способом можна оцінити межу вогнестійкості повнорозмірної конструкції.

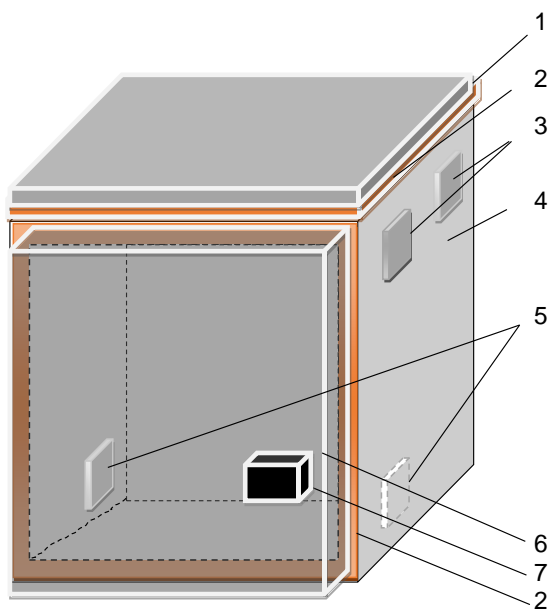


Рисунок 5.15 – Схема встановлення зразка для випробувань: 1 – досліджуваний зразок; 2 – ущільнювач із мінеральної вати й вапняного шнура; 3 – місця для пальників, що не використовуювані під час вогневих випробувань стін; 4 – огороження печі; 5 – пальники, що створюють температурний режим у камері печі; 6 – кришка, що закриває передню частину установки, 7 – отвір виходу продуктів горіння

До початку випробування зафіксовано дату проведення дослідження, температуру навколишнього повітря, вологість повітря, силу та напрям вітру (розділ 4.2.5). Перед початком заміряно габаритні розміри зразка, товщину зразка. Зафіксовано дані. Виготовлено три зразки:

- зразок 1: 1202 × 1198 мм;
- зразок 2: 1197 × 1193 мм;
- зразок 3: 1201 × 1199 мм.

Зразок для випробувань закріплено у верхній частині установки. Передня стінка установки відсутня, тому закрита кришкою (рис. 4.13). Для щільності прилягання застосовано мінеральну вату й вапняний шнур. На рис. 5.15 продемонстровано схему встановлення зразка для випробувань.

У ході випробування плит використовують два пальники, розміщені знизу установки на протилежних стінках камери діаметрально, щоб факели полум'я були розташовані на 80 см до випробувального зразка (рис. 5.15). На час проведення випробувань плит місця для пальників, що не використовували, закладені цеглою та мінеральною ватою для запобігання виходу пічних газів через отвори.

5.2.6. Засоби вимірювальної техніки. До початку випробувань встановлено термопари в просторі камери вогневої печі та на зразку:

- у камері вогневої печі розташовані три термопари типу ТХА для контролю температурного режиму та його стандартного увідповіднення;
- на обігрівальній поверхні зразка та на рівні арматури – по 5 терморезисторів (рис. 4.25);
- на необігрівальній поверхні – 5 терморезисторів із діапазоном замірювання 0 – 300 °С.

Згідно з рис. 5.16, засоби вимірювальної техніки, встановлені до випробувань, розташовані та пронумеровані так: на обігрівній поверхні зразка встановлені термопари Т1 – Т5; на необігрівній поверхні – терморезистори ТР1 – ТР5; термопари Т01 – Т05 на рівні арматури (0,03 м від поверхні).

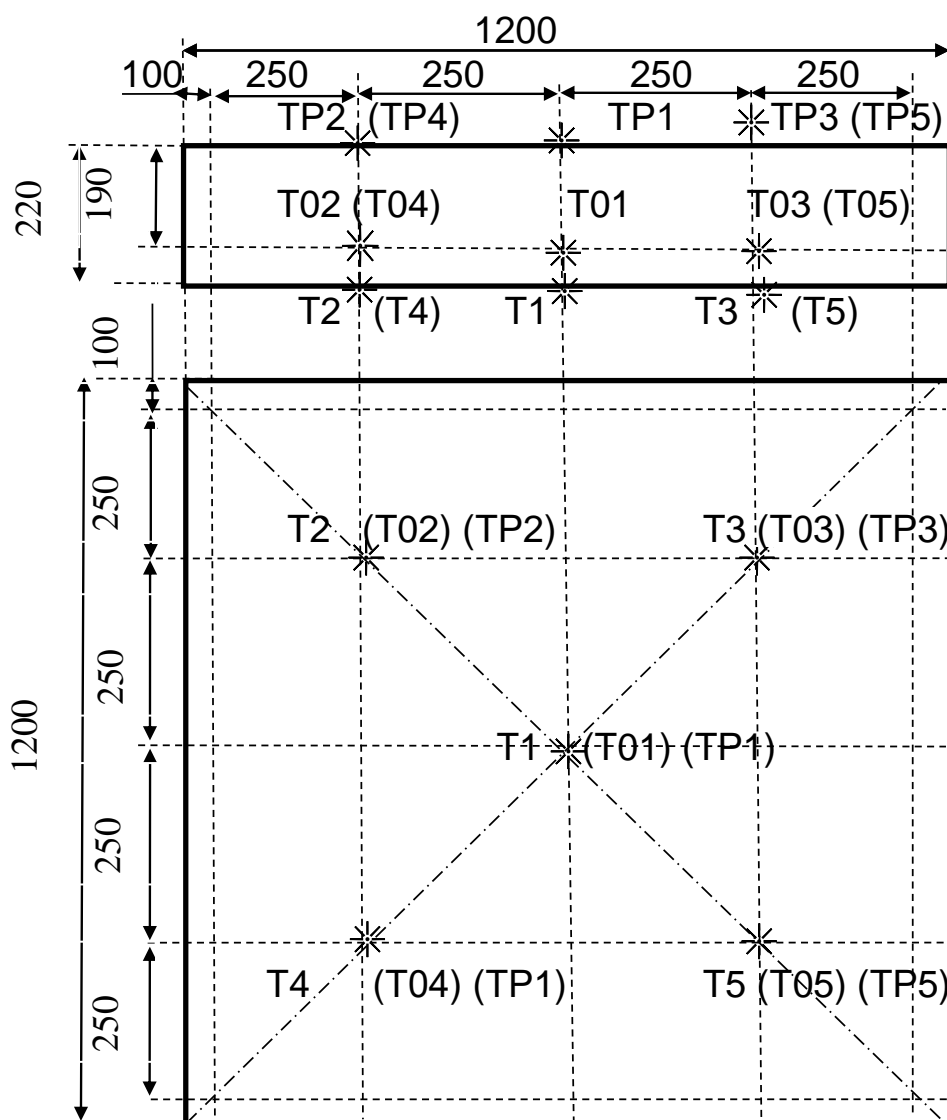


Рисунок 5.16 – Схема розташування засобів вимірювальної техніки в перерізі залізобетонної плити-зразка для випробувань

У таблиці 5.1 розділу 5.1.6 систематизовано використані під час натурального експерименту засоби вимірювальної техніки.

Для вимірювання температури в печі використано термопари ТХА-2388 із діаметром дроту 1,25 мм (рис. 5.4), що можна застосовувати для вимірювання температури в діапазоні від 0 до 1300 С.

Для вимірювання температури в аналізованому зразку використано термістори, що можна застосовувати для вимірювання температури в діапазоні від -30 до 300 С (див. розділ 4.1.6).

Для фіксації цифрових значень температури в місцях установки термопар використано модуль аналого-цифрового перетворення (АЦП) сигналу термопар. Модуль спеціально розроблений в інституті, дає змогу вимірювати температуру з чутливістю 0,25 °С. Побудований на основі мікросхеми max. 31855, що допомагає перетворювати аналоговий цифровий сигнал термопар на цифровий із максимальним значенням температури до 1350 °С. Цей модуль зважає на температуру холодних спаїв та автоматично корегує значення температури. Опис і зображення приладу наведено в розділі 5.1.6. Вони аналогічні до тих, що використані під час випробування стін.

Для опрацювання отриманих відомостей використано плагін «PLX DAQ» для «Microsoft Excel», що дає змогу в реальному часі фіксувати числові значення температури та будувати графіки.

5.2.7. Хід випробування. Під час випробувань проведено фотофіксацію і відеофіксацію експерименту.



Рисунок 5.17 – Вигляд вогневої печі перед початком випробування

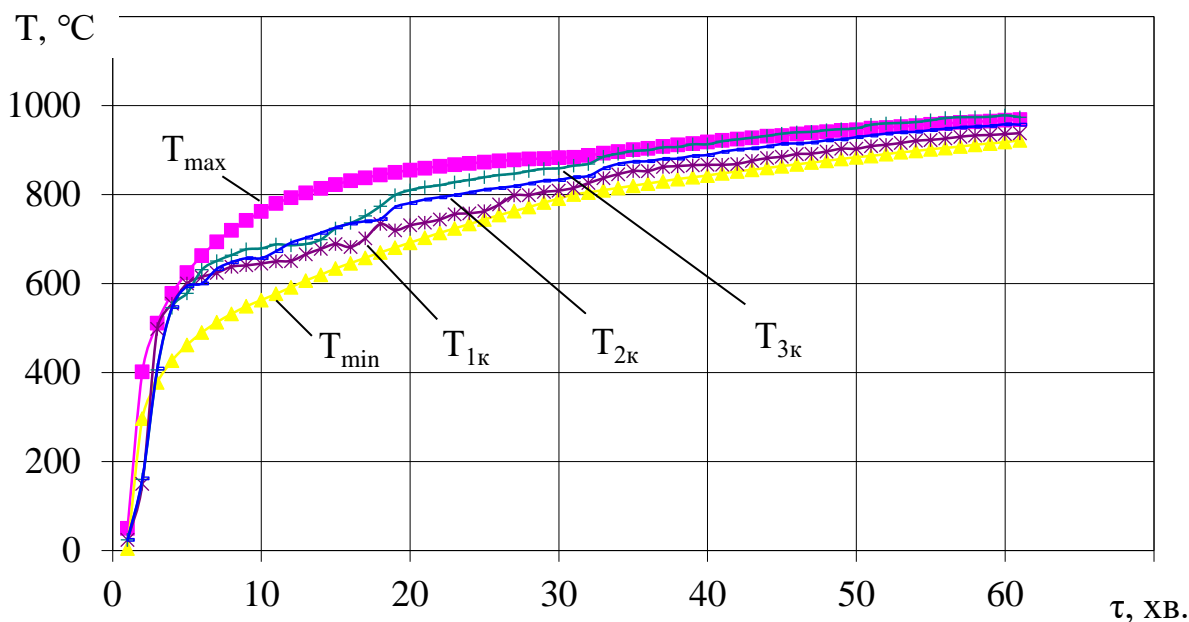


Рисунок 5.18 – Лінійна швидкість нагрівання камери печі під час випробування плити

Як засвідчують дані прогріву термопар (рис. 5.18), лінійна швидкість нагрівання камери печі була увідповіднена зі «стандартною» температурою кривою пожежі, перебувала в стандартних межах [2]. Після досягнення 980 С встановлено стаціонарний режим через регулювання потужності нагрівання печі. Тривалість випробування – 63 хвилини.

5.2.8. Результати випробувань. Дослідження обмежені 60 хвилинами, оскільки потім температурний режим здатний наблизитися до стаціонарного.

Після візуального огляду виявлено, що не відбулося втрати цілісності, теплоізоляційної та несучої здатності зразка.

На рисунку 5.19 – 5.22 відображено результати показів термопар на обігрівальній, необігрівальній поверхні та на рівні арматури.

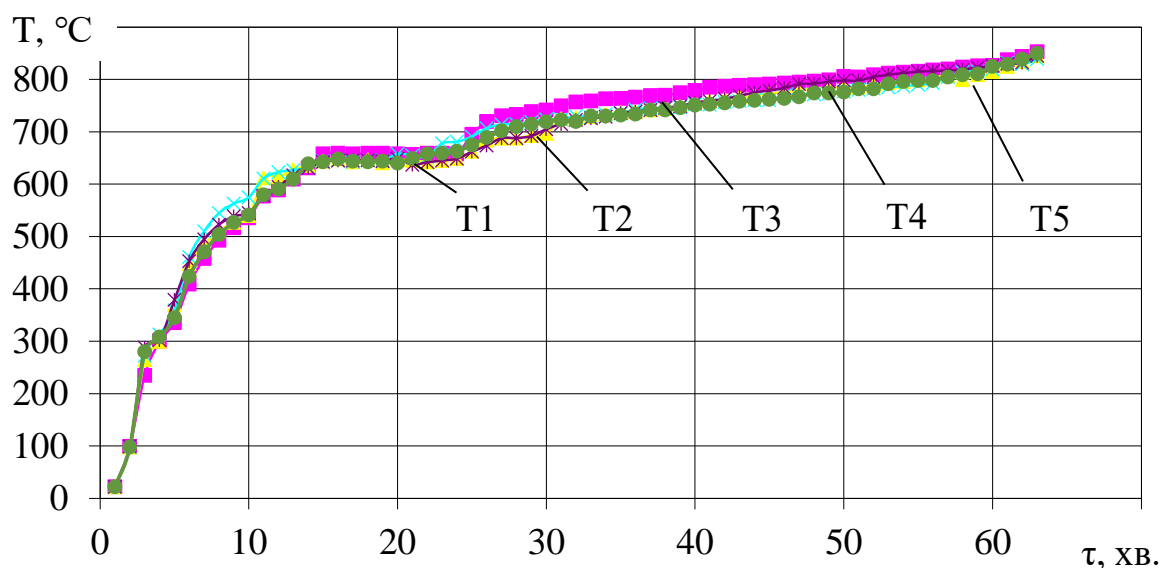


Рисунок 5.19 – Результати вимірювання температури на обігрівальній поверхні досліджуваного зразка: T1 – T5 – показники термопар (рис. 5.16)

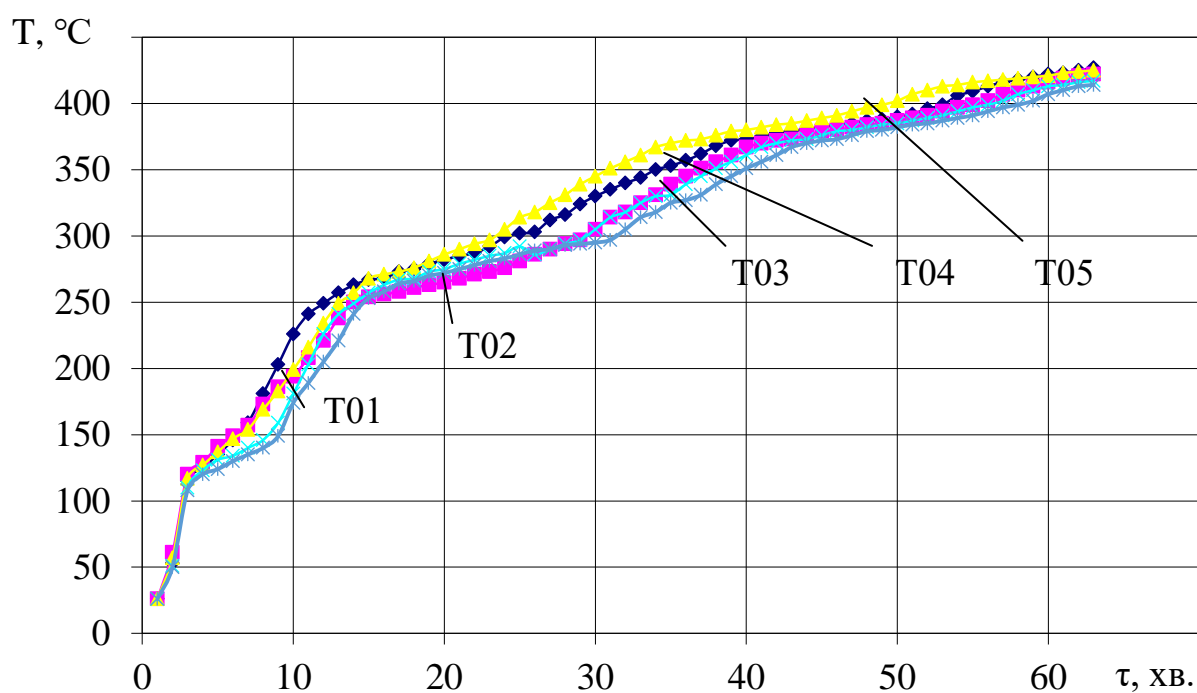


Рисунок 5.20 – Результати вимірювання температури на рівні арматури досліджуваного зразка: T01 – T05 – показники термопар (рис. 5.16)

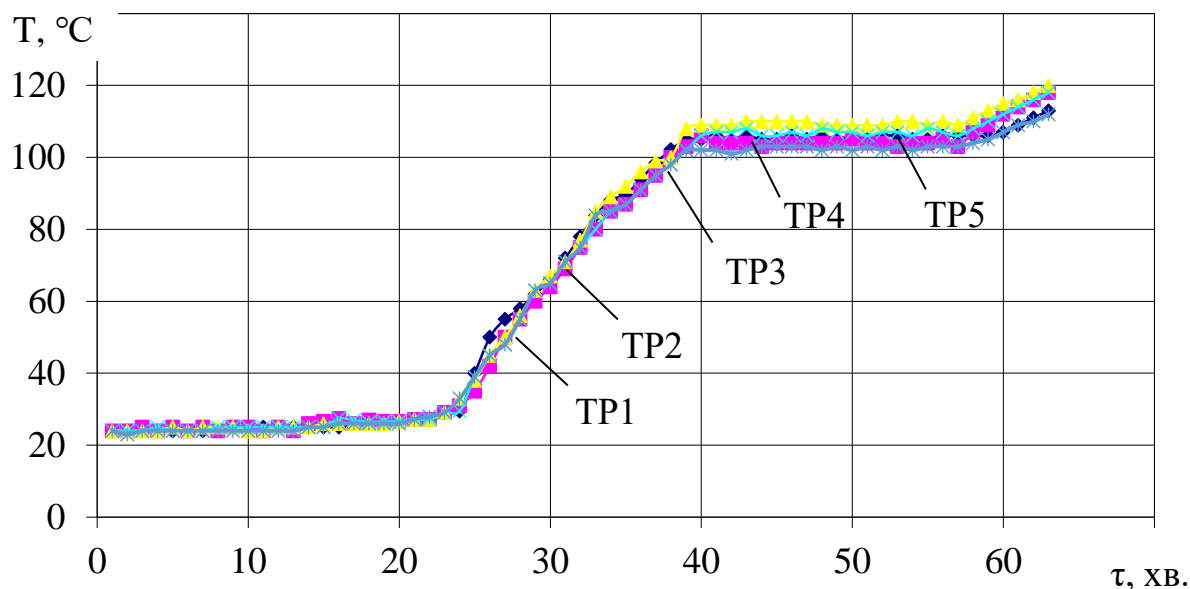


Рисунок 5.21 – Результати вимірювання температури на необігрівальній поверхні досліджуваного зразка: TP1 – TP5 – показники термопар (рис. 5.16)

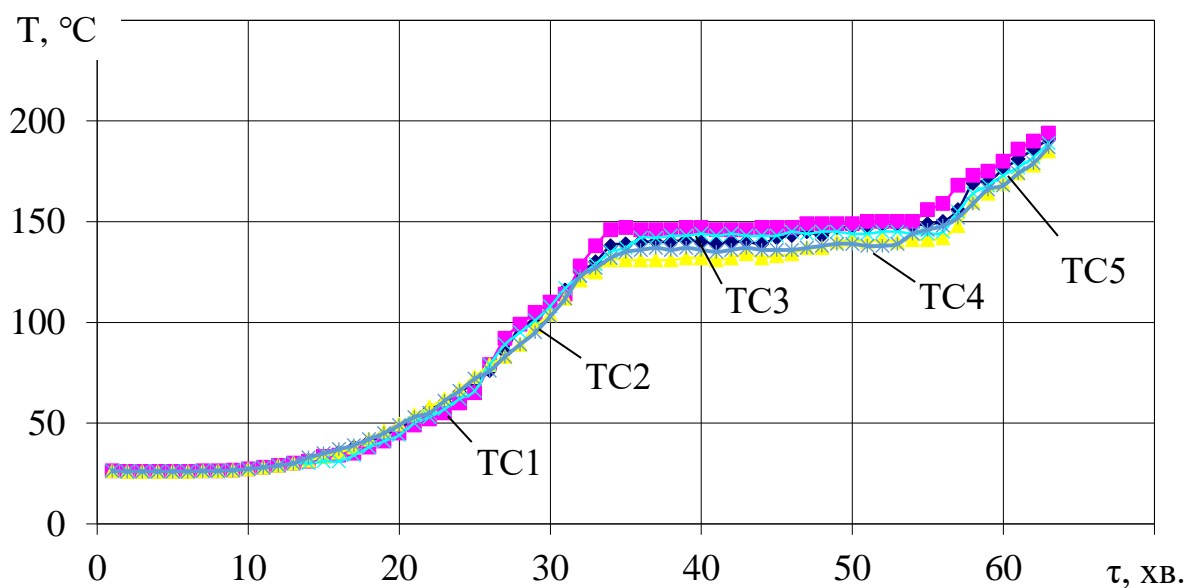


Рисунок 5.22 – Результати вимірювання температури на товщині 110 мм (середина плити): TC1 – TC5 – показники термопар

Унаслідок аналізу отриманих експериментальних даних (рис. 5.18 – 5.20), сформульовано такі висновки:

- два газові пальники здатні увідповіднити температурний режим у камері печі зі «стандартним» [2];
- під час нагрівання залізобетону простежуване виділення вологи й пари, що біли всередині матеріалу: на обігрівальній поверхні процес відбувався з 15 до 25 хвилини (рис. 5.19), на необігрівальній – із 39 до 57 хвилини (рис. 5.21), на рівні арматури – із 31 до 55 хвилини (рис. 5.20);
- прогрів конструкції на всіх рівнях був рівномірним у площинах розміщення термопар (рис 5.19 – 5.22);
- максимальна температура на рівні арматури дорівнювала 200 °С, була простежувана на останній хвилині експерименту та лінійно зростала після виходу з плато;
- максимальна температура на необігрівальній поверхні сягала 110 °С, була простежувана на останній хвилині експерименту та лінійно зростала після виходу з плато;
- необхідно верифікувати експериментальні дані для підтвердження їхньої достовірності;
- отриманих експериментальних даних достатньо для подальшого розрахунку температурних полів усередині конструкції та оцінювання вогнестійкості конструкцій.

5.3. Результати експериментальних досліджень із нагрівання фрагментів залізобетонних колон

5.3.1. Об'єкти випробування. Фрагменти залізобетонних колон перерізом 200×200 мм номінальним розміром 1000 мм були виготовлені заздалегідь до випробування. Рецептuru виготовлення зразку взято з [136] з метою створення можливості порівняння отриманих результатів з опублікованими раніше.

Пропорції фрагментів (на 1 м³): портландцемент марки «500» – 460± 10 кг; пісок кварцовий – 660 ± 10 кг; щебінь гранітний – 1150 ± 10 кг; вода.

Армування дібране відповідно до фактично використовуваного на будівництві плит сучасних житлових будинків із монолітного залізобетону. Арматура – дріт класу Вр-І діаметром 5 мм.

Водо-цементне співвідношення: $V/C = 0,3 \times (\text{вода} - 138 \pm 10 \text{ кг})$; з однаковими фракціями гранітного заповнювача (щебня) – 5–10 мм.

На рис. 5.23 подано фото заздалегідь підготовленого фрагмента, зразка № 1, для натурального випробування з вогнестійкості.

Складники дозовано за допомогою вагових дозаторів заводського виконання. Бетонну суміш перемішано в бетономішалці вільного падіння об'ємом 0,75 м³. Ущільнення бетонної суміші виконане за допомогою глибинних вібраторів.

Конструкцію виготовлено за допомогою стандартної розбірної опалубки.

Зразки перебували в опалубці протягом семи днів. Після розпалубки фрагмент і допоміжні зразки зберігали впродовж 28 діб.



Рисунок 5.23 – Малогабаритний фрагмент залізобетонної колони, виготовленої заздалегідь до випробування: 1 фрагмент заздалегідь виготовленої залізобетонної колони

Після 28-денного витримування фрагменти перебували в нормальних умовах температури й вологості до випробувань.

Згідно з рисунком 5.23, зразки колон транспортовано до місця випробувань та встановлено у вогневу піч.

5.3.2. Нормативна база. Для проведення випробувань використано метод, відповідно до нормативних документів:

ДСТУ Б В.1.1-4-98*	Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги [2].
ДСТУ Б В.1.1-14:2007	Захист від пожежі. Колони. Метод випробувань на вогнестійкість [34].
ДСТУ 2272:2006	Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять [28].
НАПБ А.01.001-2014	Правила пожежної безпеки в Україні [27].
ДБН В.2.6-98:2009	Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [29].
ДБН В. 1.1.7-2016	Пожежна безпека об'єктів будівництва [1].

5.3.3. Мета випробувань. Мета – отримати результати температурних розподілів на поверхні та в точках інтегрування в перерізах фрагментів залізобетонних колон для подальшого розрахункового оцінювання їхньої межі вогнестійкості; перевірка відтворюваності експериментальних даних.

5.3.4. Місце та умови проведення випробувань. Навчальний комплекс практичної підготовки фахівців Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України (с. Свидівок Черкаського району Черкаської області). Зовнішні умови:

– дата проведення випробувань – 12.09.2021;

– температура повітря –	23 ⁺¹ °C;
– вологість повітря –	62 %;
– вітер північно-західний –	2-3 м/с.

5.3.5. Методика випробувань. Загальну методику випробувань у компактній вогневій печі без механічного навантаження описано в розділі 5.2.3. Методика полягає у впливі стандартного температурного режиму пожежі за чотиристороннього нагрівання елемента залізобетонної колони. На основі отриманих даних розрахунковим способом можна оцінити межу вогнестійкості повнорозмірної конструкції.

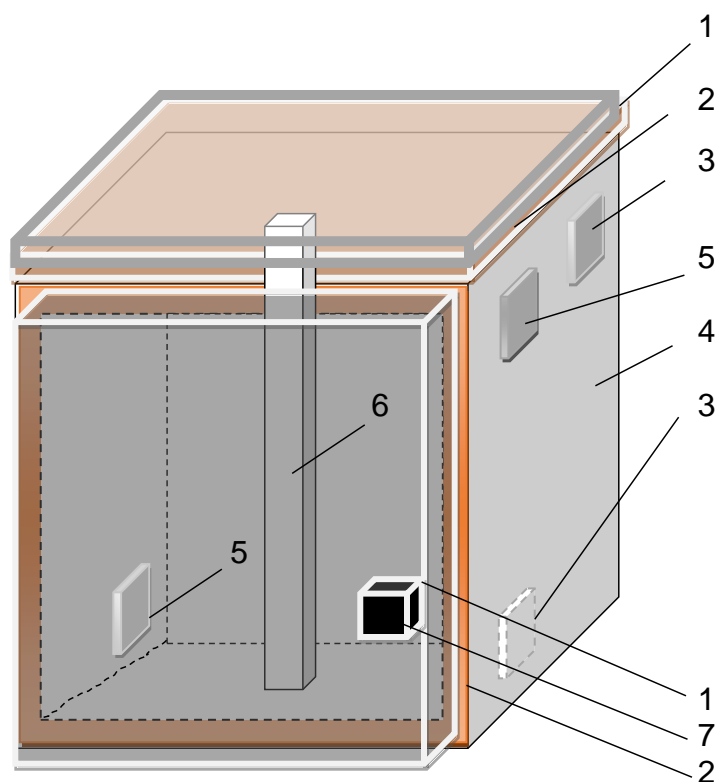


Рисунок 5.24 – Схема встановлення зразка для випробувань: 1 – кришка, що закриває передню і верхню частини установки; 2 – ущільнювач із мінеральної вати й вапняного шнура; 3 – місця для пальників, що не використовуювані під час вогневих випробувань стін; 4 – огороження печі; 5 – пальники, що створюють температурний режим у камері печі; 6 – досліджуваний зразок, 7 – отвір виходу продуктів горіння.

До випробування зафіксовано дату проведення дослідження, температуру навколишнього повітря, вологість повітря, силу та напрям вітру (розділ 5.3.4). Перед початком заміряно габаритні розміри зразка, товщину зразка та зафіксовано встановлені дані. Виготовлено три зразки:

- зразок 1 – $200 \times 200 \times 998$ мм;
- зразок 2 – $200 \times 200 \times 997$ мм;
- зразок 3 – $200 \times 200 \times 997$ мм.

Зразок для випробувань розміщено вертикально в геометричному центрі камери печі установки. Передня стінка установки відсутня, тому закрита кришкою (рис. 5.23). Для щільності прилягання застосовано мінеральну вату й вапняний шнур. На рис. 5.24 запропоновано схему встановлення зразка для випробувань.

У процесі випробування колон використано два пальники, розміщені діаметрально протилежно знизу та зверху установки на протилежних стінках камери, щоб факели полум'я не перехрещувалися (рис. 4.22). На час випробування колон місця для пальників, що не використовували, закладені цеглою та мінеральною ватою для запобігання виходу пічних газів через отвори.

5.3.6. Засоби вимірювальної техніки. До початку випробувань встановлено термомпари в просторі камери вогневої печі та на зразку:

- у камері вогневої печі розташовані три термомпари типу ТХА для контролю температурного режиму та його увідповіднення зі стандартним;
- на обігрівальній поверхні зразка розміщено дві термомпари (рис. 4.31);
- три термомпари розташовані всередині залізобетонної колони, одна з яких у центрі (рис. 4.31).

У таблиці 5.1 розділу 5.1.6 систематизовано використані під час натурального експерименту засоби вимірювальної техніки.

Для вимірювання температури в печі застосовано термопари ТХА-2388 із діаметром дроту 1,25 мм (рис. 5.4), що можна використовувати для визначення температури в діапазоні від 0 до 1300 С.

Згідно з рис. 5.25, засоби вимірювальної техніки, встановлені до випробувань, розташовані та пронумеровані так: на обігрівній поверхні зразка – термопари Т3 та Т5; термопара Т1 – у геометричному центр; термопари Т2 і Т4 – на лініях симетрії.

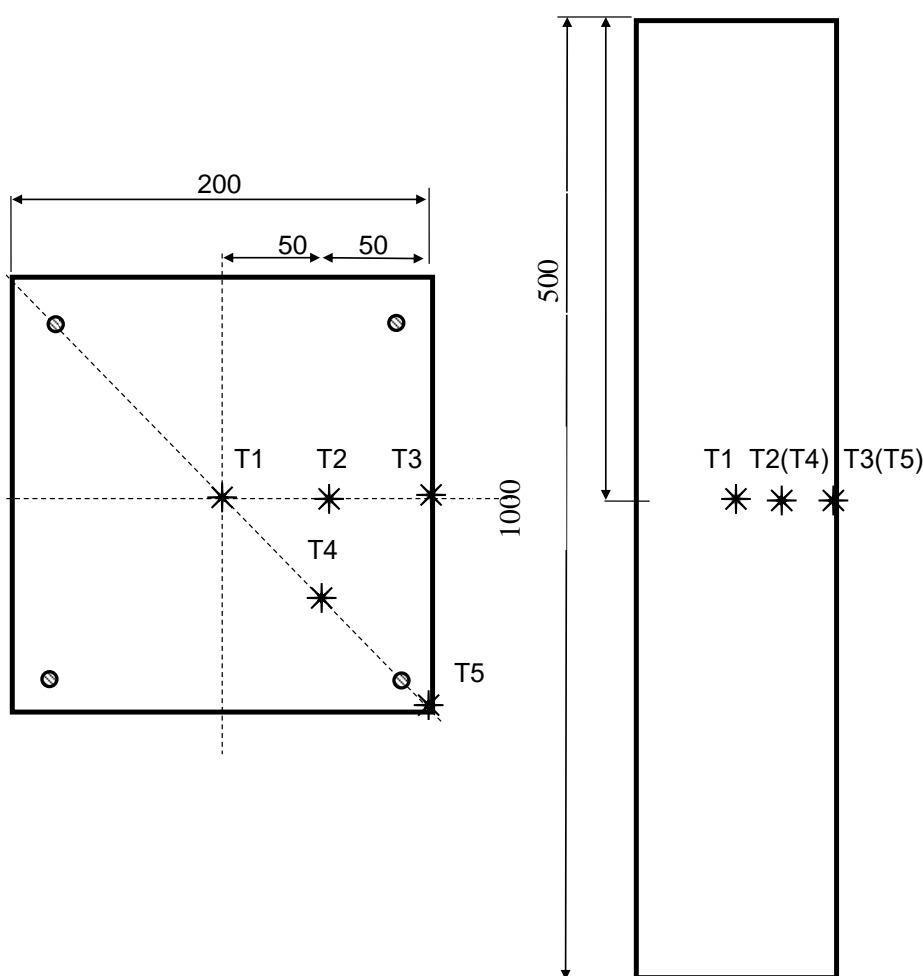


Рисунок 5.25 – Схема розташування засобів вимірювальної техніки в перерізі залізобетонної плити-зразка для випробувань

Для фіксування цифрових показників температури в місцях установлення термопари використано модуль аналого-цифрового перетворення (АЦП) сигналу

термопар. Модуль спеціально розроблений в інституті. Дає змогу вимірювати температуру з чутливістю $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Побудований на основі мікросхеми max. 31855, що дає змогу перетворювати аналоговий цифровий сигнал термопар на цифровий із максимальним значенням температури до $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Цей модуль зважає на температуру холодних спаїв та автоматично корегує значення температури. Опис і зображення приладу наведено в розділі 5.1.6, вони аналогічні до тих, що використані під час випробування стін.

Для опрацювання отриманих даних використано плагін «PLX DAQ» для «Microsoft Excel», що допомагає в реальному часі фіксувати числові значення температури та будувати графіки.

5.3.7. Хід випробування. Під час випробувань організовано фотофіксацію і відеофіксацію експерименту.



Рисунок 5.26 – Вигляд вогневої печі перед початком випробування

На рис. 5.27 представлено показники термопар, за допомогою яких організовано контроль температури всередині вогневої печі.

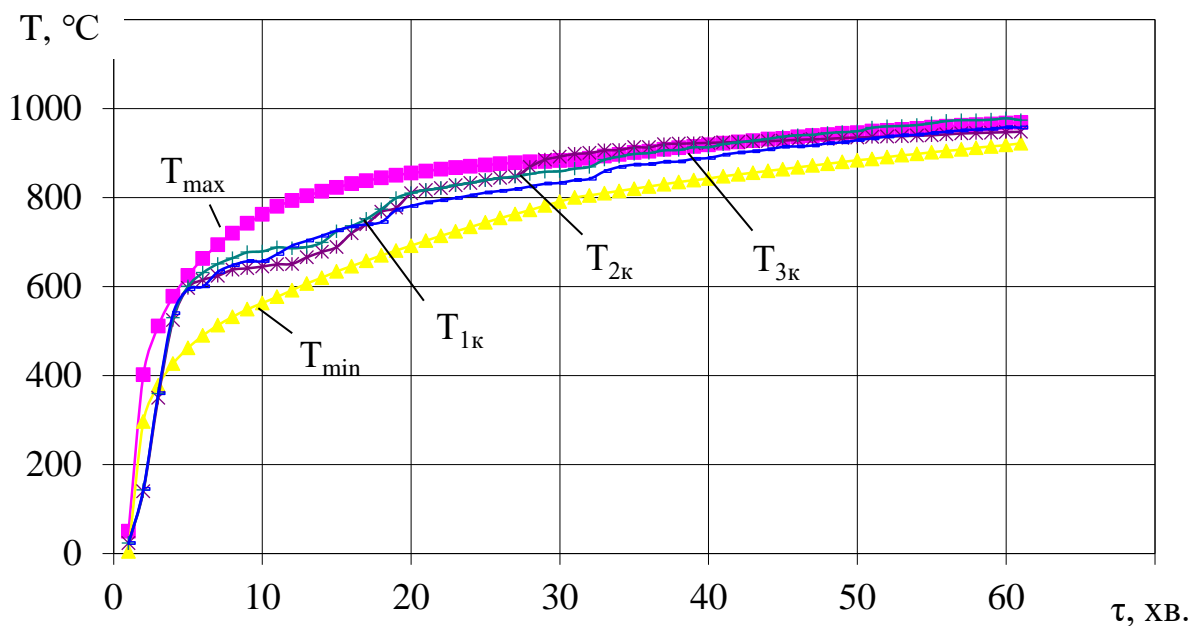


Рисунок 5.27 – Лінійна швидкість нагрівання камери печі під час випробування колони

Як засвідчують дані прогріву термопар (рис. 5.27), лінійна швидкість нагрівання камери печі увідповіднена зі «стандартною» температурною кривою пожежі, перебуває в стандартних межах [2]. Після досягнення 980 С встановлено стаціонарний режим через регулювання потужності нагрівання печі. Тривалість випробування – 63 хвилини.

5.3.8. Результати випробувань. Дослідження обмежені 60 хвилинами, оскільки потім температурний режим здатний наблизитися до стаціонарного.

Унаслідок візуального огляду виявлено, що не відбулося втрати цілісності, теплоізолювальної та несучої здатності зразка.

На рисунку 5.28 відображено результати показників термопар усередині та на поверхні залізобетонної колони під час випробувань.

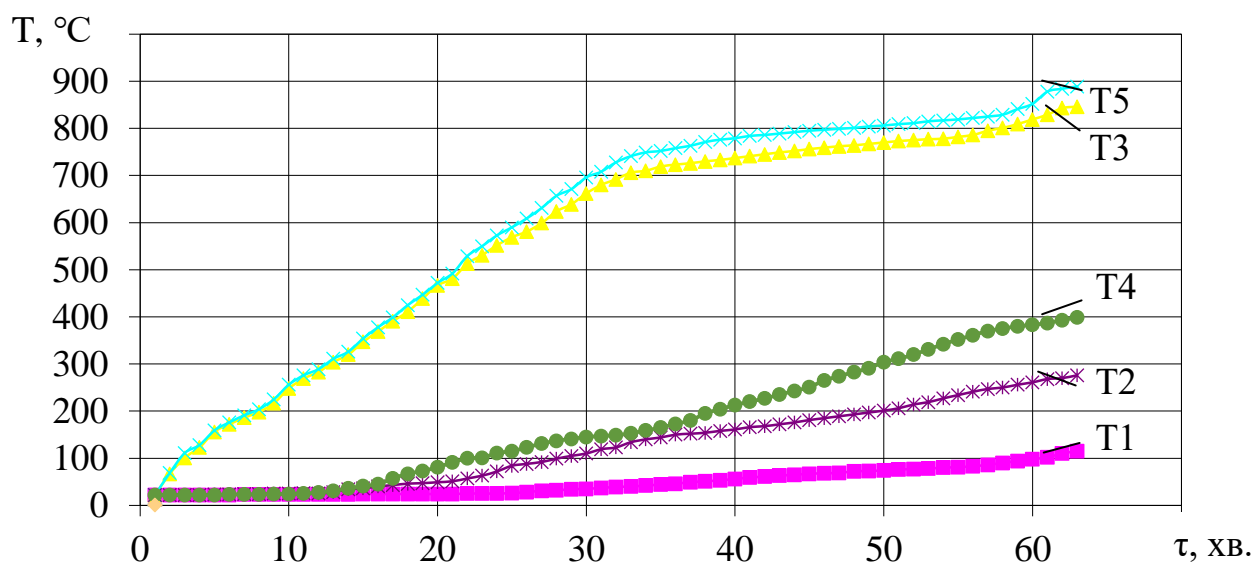


Рисунок 5.28 – Результати вимірювання температури досліджуваного зразка: T1 – T5 – показники термопар (рис. 5.25)

На підставі аналізу отриманих експериментальних результатів (рис. 5.28), сформульовано такі висновки:

- два газові пальники здатні увідповіднити температурний режим у камері печі зі «стандартним» [2];
- прогрів конструкції на всіх рівнях був рівномірним у площинах розташування термопар (рис 5.28);
- максимальна температура на поверхні дорівнює 709 °C, була простежувана на останній хвилині експерименту та лінійно зростала;
- максимальна температура в центрі колони сягнула 105 °C, була простежувана на останній хвилині експерименту та лінійно зростала;
- необхідно верифікувати експериментальні дані для підтвердження їхньої достовірності;
- отриманих експериментальних даних достатньо для подальшого розрахунку температурних полів усередині конструкції та оцінювання вогнестійкості конструкцій.

5.4. Випробування балки

5.4.1. Об'єкти випробування. Фрагменти залізобетонних балок перерізом 200×300 мм номінальним розміром 1000 мм виготовлені заздалегідь до випробування. Рецептуру виготовлення зразку взято з [136] з метою створення можливості порівняння отриманих результатів з опублікованими раніше.

На рис. 5.29 представлено фото заздалегідь підготовленого фрагмента, зразка № 1, для натурального випробування з вогнестійкості.



Рисунок 5.29 – Малогабаритний фрагмент залізобетонної балки, виготовленої заздалегідь до випробування: 1 фрагмент заздалегідь виготовленої залізобетонної балки

Пропорції фрагментів (на 1 м^3): портландцемент марки «500» -460 ± 10 кг; пісок кварцовий – 660 ± 10 кг; щебінь гранітний – 1150 ± 10 кг; вода.

Армування передбачене відповідно до фактично використовуваного під час будівництва плит сучасних житлових будинків із монолітного залізобетону. Арматура – дріт класу Вр-I діаметром 5 мм.

Водо-цементне співвідношення: $V/C = 0,3 \times (\text{вода} - 138 \pm 10 \text{ кг})$; з однаковими фракціями гранітного заповнювача (щебня) – 5–10 мм.

Складники дозовано за допомогою вагових дозаторів заводського ВИКОНАННЯ. Бетонну суміш змішано в бетономішалці вільного падіння об'ємом $0,75 \text{ м}^3$. Ущільнення бетонної суміші реалізоване через глибинні вібратори.

Конструкцію виготовлено за допомогою стандартної розбірної опалубки.

Зразки перебували в опалубці протягом семи днів. Після розпалубки фрагмент і допоміжні зразки зберігалися впродовж 28 діб.

Після 28-денного витримування фрагменти зберігалися в нормальних умовах температури й вологості до випробувань.

Згідно з рисунком 5.29, зразки балки транспортовано до місця випробувань та встановлено у вогневу піч.

5.4.2. Нормативна база. Для проведення випробувань використано метод, відповідно до нормативних документів:

ДСТУ Б В.1.1-4-98*	Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги [2].
ДСТУ Б В.1.1-13:2007	Захист від пожежі. Балки. Метод випробування на вогнестійкість [31].
ДСТУ 2272:2006	Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять [28].
НАПБ А.01.001-2014	Правила пожежної безпеки в Україні [27].
ДБН В.2.6-98:2009	Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [29].
ДБН В. 1.1.7-2016	Пожежна безпека об'єктів будівництва [1].

5.4.3. Мета випробувань. Мета – отримати результати температурних розподілів на поверхні та в точках інтегрування в перерізах фрагментів залізобетонних балок для подальшого розрахункового оцінювання їхньої межі вогнестійкості; перевірка відтворюваності експериментальних даних.

5.4.4. Місце та умови проведення випробувань. Навчальний комплекс практичної підготовки фахівців Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України (с. Свидівок Черкаського району Черкаської області). Зовнішні умови:

- дата проведення випробувань – 15.09.2021;
- температура повітря – 22^{+1} °C;
- вологість повітря – 61 %;
- вітер північно-західний: 2-3 м/с.

5.4.5. Методика випробувань. Загальну методику проведення випробувань у компактній вогневій печі без механічного навантаження описано в розділі 4.2.5. Методика полягає у впливі стандартного температурного режиму пожежі за тристороннього нагрівання елемента залізобетонної балки. На основі отриманих даних розрахунковим способом можна оцінити межу вогнестійкості повнорозмірної конструкції.

До моменту випробування зафіксовано дату проведення дослідження, температуру навколишнього повітря, вологість повітря, силу й напрям вітру (розділ 5.4.4). Перед початком заміряно габаритні розміри зразка, товщину зразка та зафіксовано встановлені дані. Виготовлено три зразки:

- зразок 1 – $200 \times 300 \times 998$ мм;
- зразок 2 – $200 \times 300 \times 999$ мм;
- зразок 3 – $20 \times 300 \times 998$ мм.

Зразок для випробувань розміщений вертикально в геометричному центрі камери печі установки. Передня стінка установки відсутня, тому закрита

кришкою (рис. 5.29). Для щільності прилягання застосовано мінеральну вату та вапняний шнур. На рис. 5.30 подано схему встановлення зразка для випробувань.

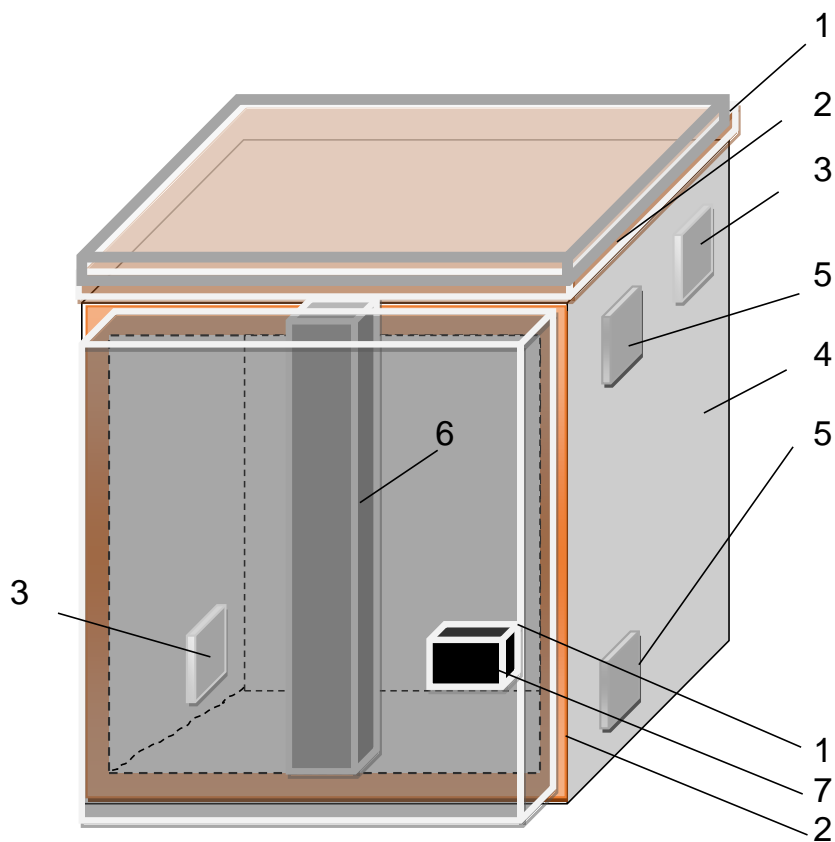


Рисунок 5.30 – Схема встановлення зразка для випробувань: 1 – кришка, що закриває передню та верхню частину установки; 2 – ущільнювач із мінеральної вати й вапняного шнура; 3 – місця для пальників, що не використовують під час вогневих випробувань стін; 4 – огороження печі; 5 – пальники, що створюють температурний режим у камері печі; 6 – досліджуваний зразок, 7 – отвір виходу продуктів горіння

Під час випробування балок використовують два пальники, розміщені знизу та зверху установки на протилежних стінках камери, щоб факели полум'я не перехрещувалися (рис. 5.30). На час випробувань балок місця для пальників, що не використовували, закладені цеглою та мінеральною ватою для запобігання виходу пічних газів через отвори.

5.4.6. Засоби вимірювальної техніки. До початку випробувань встановлено термомпари в просторі камери вогневої печі та на зразку:

- у камері вогневої печі розташовані три термомпари типу ТХА для контролю температурного режиму та його увідповіднення зі стандартним;
- на обігрівальній поверхні зразка розміщено три термомпари (рис. 5.31);
- чотири термомпари розташовані всередині залізобетонної балки, одна з яких – у центрі (рис. 5.31);
- одна термомпара розміщена на необігрівальній поверхні.

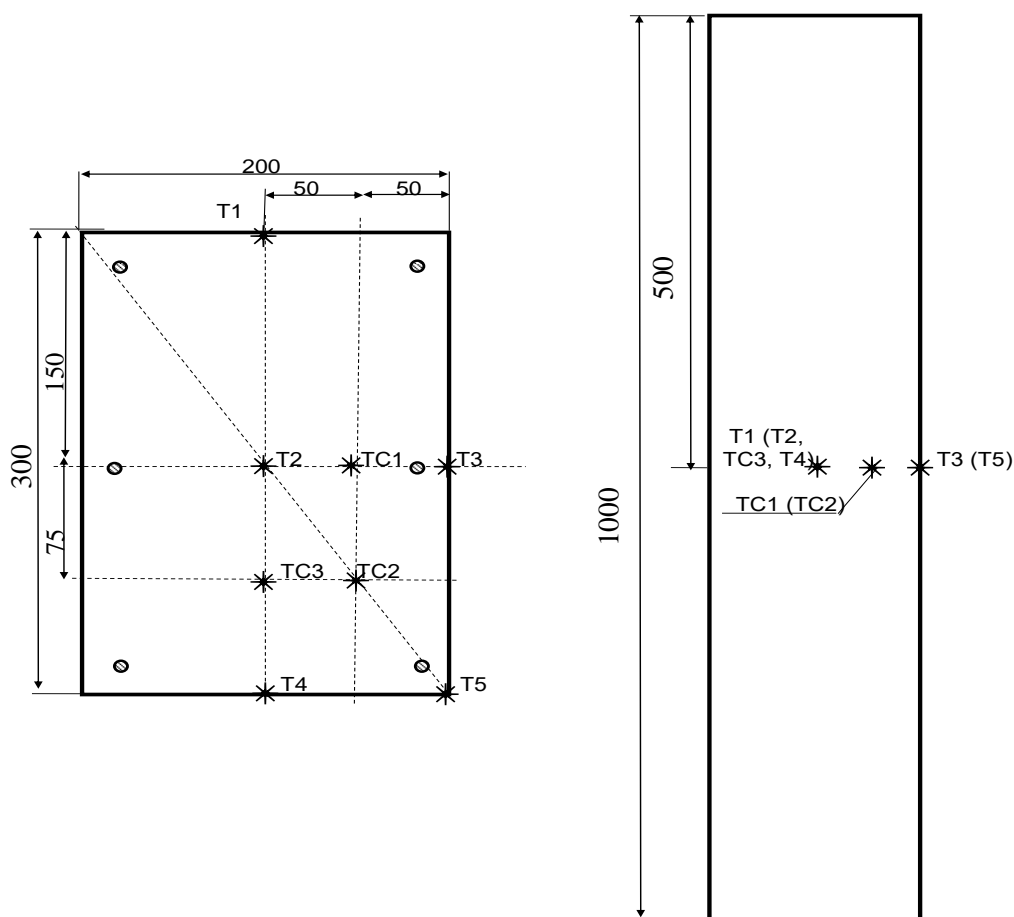


Рисунок 5.31 – Схема розташування засобів вимірювальної техніки в перерізі залізобетонної плити-зразка для випробувань

Згідно з рис. 5.31, засоби вимірювальної техніки, встановлені до моменту випробувань, розміщені та пронумеровані так: на обігрівній поверхні зразка –

термопари Т3 – Т5; термопара Т2 – у геометричному центрі, термопара Т1 – на необігрівальній поверхні, термопари ТС1 – ТС3 – на лініях розмежування.

У таблиці 5.1 розділу 5.1.6 систематизовано використані під час натурального експерименту засоби вимірювальної техніки. Для вимірювання температури в печі використано термопари ТХА-2388 із діаметром дроту 1,25 мм (рис. 5.4), які можна застосовувати для вимірювання температури в діапазоні від 0 до 1300 С.

Для фіксації цифрових значень температури в місцях установки термопари використано модуль аналого-цифрового перетворення (АЦП) сигналу термопари. Модуль спеціально розроблений в інституті, дає змогу вимірювати температуру з чутливістю 0,25 °С. Побудований на основі мікросхеми max. 31855, що допомагає перетворювати аналоговий цифровий сигнал термопар на цифровий із максимальним значенням температури до 1350 °С. Цей модуль зважає на температуру холодних спайів та автоматично корегує значення вимірювання температури. Опис і зображення приладу подано в розділі 5.1.6, вони аналогічні до тих, що використані під час випробування стін.

Для опрацювання отриманих даних використано плагін «PLX DAQ» для «Microsoft Excel», що дає змогу в реальному часі фіксувати числові значення температури та будувати графіки.

5.4.7. Хід випробування. Під час проведено фотофіксацію і відеофіксацію експерименту.



Рисунок 5.32 – Вигляд зразка у вогневій печі після випробування

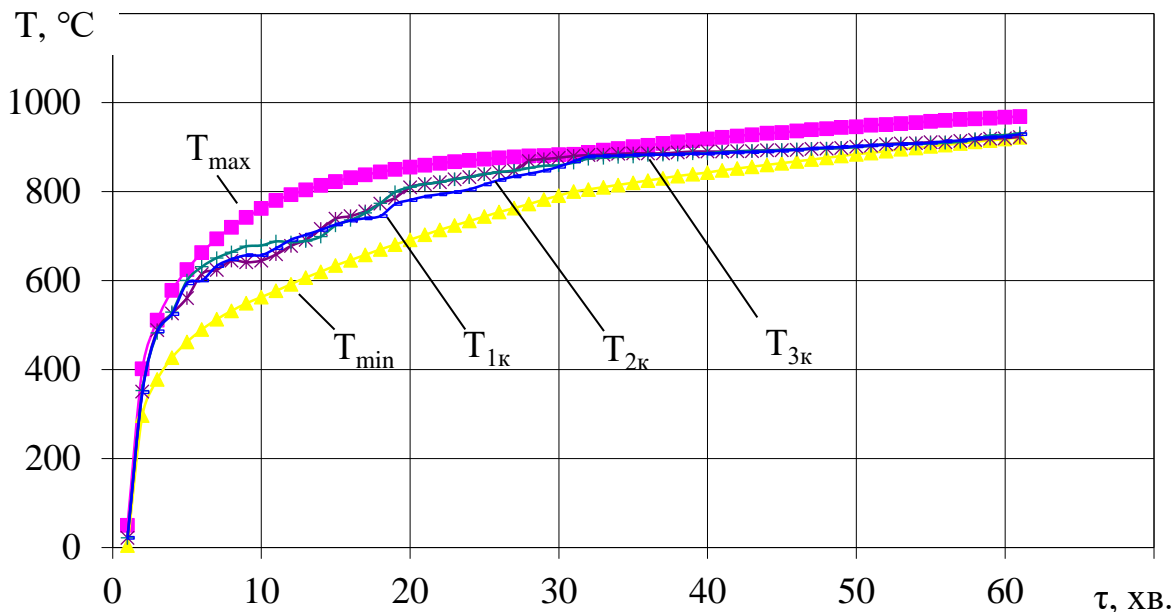


Рисунок 5.33 – Лінійна швидкість нагрівання камери печі під час випробування балки

Як засвідчують дані прогріву термопар (рис. 5.33), лінійна швидкість нагрівання камери печі була увідповіднена зі «стандартною» температурною кривою пожежі, перебувала в стандартних межах [2]. Після досягнення 950 С встановлено стаціонарний режим через регулювання потужності нагрівання печі. Тривалість випробування – 63 хвилини.

5.4.8. Результати випробувань. Дослідження обмежені 60 хвилинами, оскільки потім температурний режим здатний наблизитися до стаціонарного.

Унаслідок візуального огляду виявлено, що не відбулося втрати цілісності, теплоізолювальної та несучої здатності зразка.

На рисунку 5.33 відображено результати показів термопар T1 – T5 усередині й на поверхні залізобетонної балки під час випробувань.

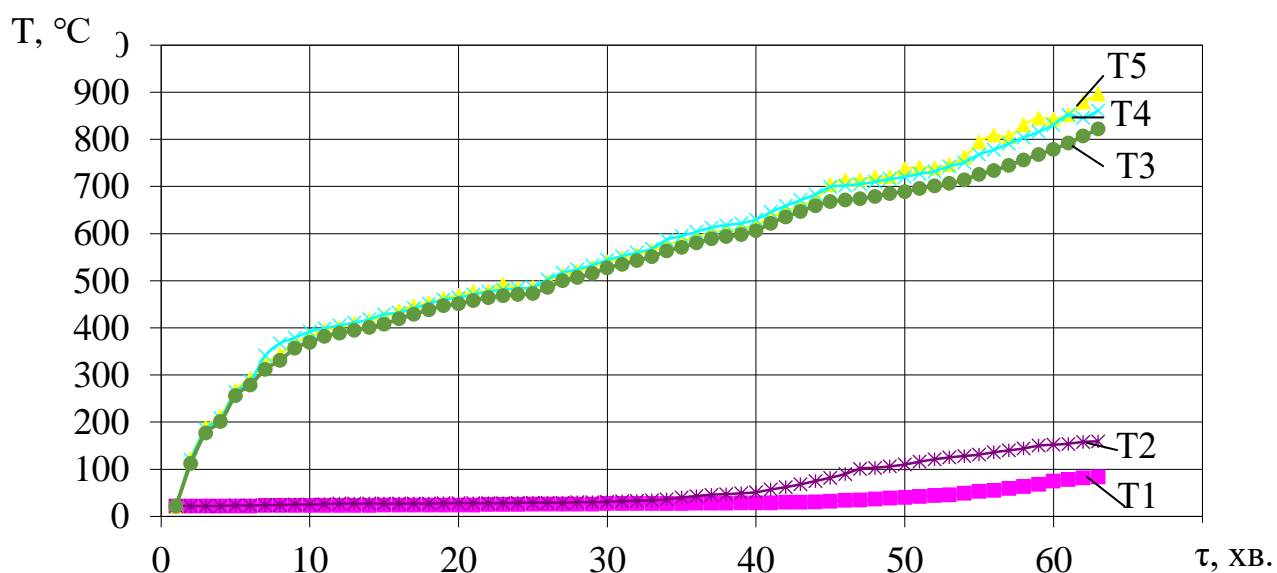


Рисунок 5.34 – Результати вимірювання температури досліджуваного зразка: T1 – T5 – показники термопар (рис. 5.29)

На рисунку 5.34 представлено результати показників термопар T1 – T5 усередині та на поверхні залізобетонної балки під час випробувань.

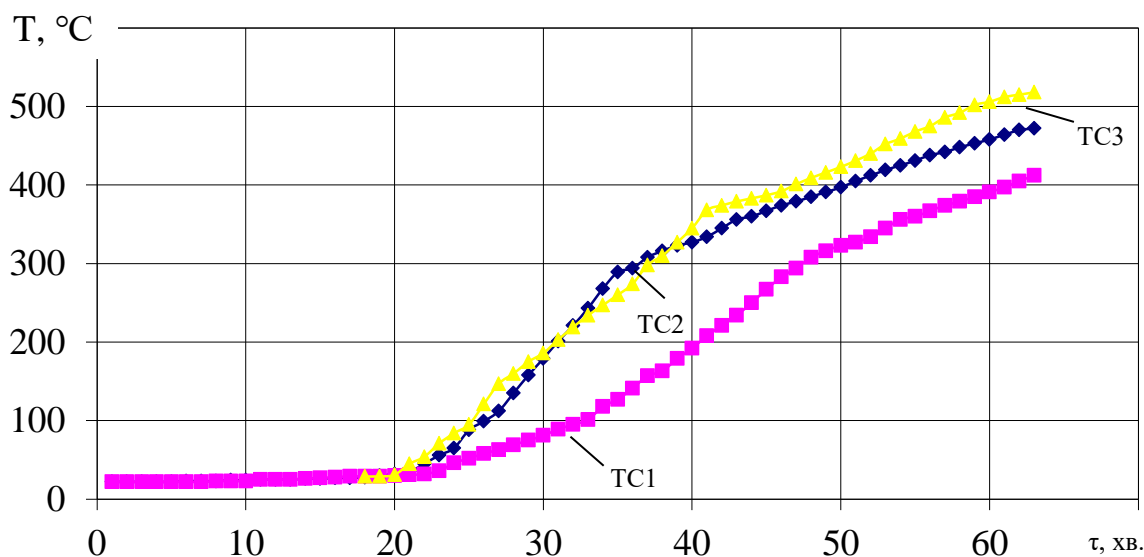


Рисунок 5.35 – Результати вимірювання температури на лініях розмежування: TC1 – TC3 – показники термопар (рис. 5.30)

На підставі аналізу експериментальних даних (рис. 5.34 – 5.35), сформульовано такі висновки:

- два газові пальники здатні увідповіднити температурний режим у камері печі зі «стандартним» [2];
- прогрів конструкції на всіх рівнях був рівномірним у площинах розміщення термопар (рис. 5.34 – рис. 5.35);
- максимальна температура на поверхні сягнула 806 °С, була простежувана на останній хвилині експерименту та лінійно зростала;
- максимальна температура в центрі балки дорівнювала 159 °С, була простежувана на останній хвилині експерименту та лінійно зростала;
- максимальна температура на необігрівальній поверхні балки становила 84 °С, була простежувана на останній хвилині експерименту та лінійно зростала;
- необхідно верифікувати експериментальні дані для підтвердження їхньої достовірності;
- отриманих експериментальних даних достатньо для подальшого розрахунку температурних полів усередині конструкції та оцінювання вогнестійкості конструкцій.

5.5. Верифікація експериментальних даних

Адекватність експериментальних даних перевірено щодо кожного виду будівельних конструкцій. Отримано відомості про випробування трьох ідентичних конструкцій кожного порівнюваного виду.

Для аналізу здатності експериментів відтворювати результати потрібно одержати кількісні показники стосовно адекватності випробувань. Перевірку адекватності виконано на підставі експериментальної інформації, отриманої внаслідок вогневих випробувань фрагментів будівельної конструкції [70].

Проведено три експерименти за стандартним температурним режимом пожежі в прототипі вогневої печі для чотирьох видів залізобетонних конструкцій

(стіни, плити перекриття, колони та балки), результати описано в розділах 5.1 – 5.4.

5.5.1. Перевірка адекватності під час випробування стін. Для з'ясування адекватності результатів експериментальних даних у ході випробувань стін вибрано низку критеріїв, що схарактеризовані нижче.

F-критерій Фішера застосовують для послідовного зіставлення дисперсій показників температури кожної термопари, що розташовані в конструкції з дисперсією відтворюваності експериментальних досліджень. Застосування критерію Фішера вможлиблює верифікацію гіпотези про рівність генеральних дисперсій, розподіл температур на кожній хвилині випробувань.

$$F = \frac{S_{xy}^2}{S_y^2} \quad (5.1),$$

де S_{xy}^2 – дисперсія адекватності, S_y^2 – дисперсія відтворюваності.

Дисперсія адекватності розрахована як відхилення між показниками конкретної термопари й середнього значення температури в усіх трьох експериментах щодо місця замірювання температури.

$$S_{xy}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n} \quad (5.2),$$

де n – кількість температури замірів, y_i – середнє значення температури в усіх трьох експериментах щодо місця замірювання температури, x_i –покази конкретної термопари під час випробування.

Дисперсія відтворюваності розрахована як відхилення температури конкретної термопари й середнього значення температури по всіх дослідях у місці її розташування, з огляду на похибку термопар [1].

$$S_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y} + 1)^2 \quad (5.3),$$

де n – кількість замірювань температури, $\bar{y} + 1$ – середні показники термопар, з огляду на погрішність [1], y_i – показники термопари безпосередньо в місці заміру.

Отже, 15 значень дисперсії адекватності почергово порівняно з дисперсією відтворюваності та розраховано критерій Фішера (F).

t-критерій Стьюдента застосовують для порівняння результатів експериментів між собою:

$$t = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{\sqrt{(n_1 - 1) \cdot S_1^2 + (n_2 - 1) \cdot S_2^2}} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 \cdot (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}} \quad (5.4),$$

$$\bar{y}_{1,2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (5.5),$$

де S_1^2 , S_2^2 – оцінки дисперсій випробування між собою та в конкретному експерименті, обчислені аналогічно до розрахунку критерію Фішера, $n_{1,2}$ – кількість ступенів свободи.

Результати розрахунку критеріїв адекватності узагальнено в табл. 5.2.

Q-критерій Кохрена (визначення викидів і квазівикидів):

$$Q = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^p S_i^2}, \quad (5.6),$$

де S_{\max} – найбільше середньоквадратичне відхилення результатів випробувань.

Q-критерій використовують, порівнюючи три й більше вибірок однакового обсягу. Почергово порівняні дисперсії середніх значень показників термопар під

час експерименту в місці розташування кожної термопар з 15 дисперсіями (5 термопар у трьох дослідах). Отримано 15 значень критерію.

Таблиця 5.2

Параметри дисперсії результатів вогневих випробувань залізобетонних стін за результатами трьох експериментів

Зона термопар (рис. 5.3)	Максимальне відхилення, °С	Середнє відхилення, °С	Відносне відхилення, %	F-критерій	Критичне значення F-крит.	t-критерій	Критичне значення t-крит.	Q-критерій	Критичне значення Q-крит.
T1	23,2	5,1	3,1	2,41	4,49	1,50	2,92	0,32	0,45
T2	31,6	6,3	3,6	2,27		1,17		0,32	
T3	24,7	5,8	2,9	2,08		1,01		0,33	
T4	26,9	5,9	2,9	2,03		1,43		0,30	
T5	28,6	6,1	2,8	2,13		2,14		0,34	
T01	6,1	2,0	3,6	1,58		1,21		0,33	
T02	8,1	2,2	3,1	1,63		1,81		0,44	
T03	7,2	2,4	2,7	1,33		1,50		0,37	
T04	9,3	2,9	2,5	1,36		1,10			
T05	8,2	2,5	2,4	1,37		1,16			
TP1	5,8	2,2	2,1	1,17		1,41			
TP2	4,3	2,1	2,1	1,11		1,21			
TP3	4,2	2,3	2,2	1,15		1,48			
TP4	4,5	2,1	2,1	1,08		1,93			
TP5	4,9	2,1	2,1	1,03		1,53			

Згідно з таблицею 5.2, розраховані критерії адекватності (t-критерій Стьюдента, Q-критерій Кохрена, F-критерій Фішера) не перевищують критичних значень [181–183].

5.5.2. Перевірка адекватності під час випробування плит. Для з'ясування адекватності експериментальних результатів під час випробування плит вибрано статистичні критерії, аналогічні до верифікації результатів випробування стін.

Результати розрахунку критеріїв адекватності узагальнено в табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Параметри дисперсії результатів вогневих випробувань залізобетонних плит за трьома експериментами

Зона термопар (рис. 5.16)	Максимальне відхилення, °С	Середнє відхилення, °С	Відносне відхилення, %	F-критерій	Критичне значення F-крит.	t-критерій	Критичне значення t-крит.	Q-критерій	Критичне значення Q-крит.
T1	23,8	7,1	4,0	2,26	4,49	1,50	2,92	0,31	0,45
T2	28,6	7,2	3,7	2,32		1,17		0,34	
T3	26,4	6,7	3,9	2,28		1,01		0,32	
T4	27,9	6,9	3,7	2,23		1,43		0,30	
T5	29,1	7,1	3,5	2,33		2,14		0,34	
T01	5,8	3,1	2,9	1,38		1,21		0,33	
T02	6,4	2,8	3,2	1,43		1,81		0,32	
T03	6,2	2,5	2,9	1,29		1,50		0,31	
T04	8,3	2,6	2,8	1,32		1,10		0,34	
T05	7,1	2,7	2,8	1,34		1,16		0,31	
TP1	5,2	2,3	2,3	1,19		1,41		0,25	
TP2	5,3	2,4	2,3	1,13		1,21		0,20	
TP3	5,6	2,5	2,4	1,14		1,48		0,21	
TP4	4,9	2,1	2,2	1,23		1,93		0,23	
TP5	5,2	2,4	2,3	1,16		1,53		0,21	

F-критерій Фішера розраховано за формулою (5.1). Дисперсія адекватності – відхилення між показниками конкретної термопари й середнього значення температури в усіх трьох експериментах щодо місця замірювання температури за виразом (5.2).

Дисперсія відтворюваності – відхилення температури конкретної термопари та середнього значення температури за всіма дослідями в місці її розташування, з огляду на похибку термопар за виразом (5.3).

Отже, аналогічно до верифікації результатів випробування стін, 15 значень дисперсії адекватності почергово порівняно з дисперсією відтворюваності й розраховано критерій Фішера (F).

t-критерій Стьюдента розраховано за формулами (5.4) та (5.5), а Q-критерій Кохрена – за формулою (5.6): почергово порівняно дисперсії середніх значень показників термопар у ході експерименту в місці розташування кожної термопари з 15 дисперсіями (5 термопар у трьох дослідях). Отримано 15 значень критерію.

Згідно з таблицею 5.3, розраховані критерії адекватності (t-критерій Стьюдента, Q-критерій Кохрена, F-критерій Фішера) не перевищують критичних значень [181–183].

5.5.3. Перевірка адекватності під час випробування колон. Для з'ясування адекватності експериментальних даних у ході випробування колон вибрано статистичні критерії, аналогічні до верифікації результатів випробування стін та плит.

F-критерій Фішера розраховано за формулою (5.1). Дисперсія адекватності – відхилення між показниками конкретної термопари й середнього значення температури в усіх трьох експериментах щодо місця замірювання температури за виразом (5.2).

Дисперсія відтворюваності розрахована як відхилення мінімальної та максимальної температури в місці розташування конкретної термопари за всіма дослідями, з огляду на похибку термопар за виразом (5.7).

$$S_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_j - \bar{v} + 1)^2 \quad (5.7),$$

де n – кількість замірів температури, $\bar{v}+1$ – відхилення мінімальної та максимальної температури в місці розташування конкретної термопари за всіма дослідями [181], v_j – показники термопари безпосередньо в місці заміру.

Отже, по чергово порівняно 5 значень дисперсії адекватності з дисперсією відтворюваності та розраховано критерій Фішера (F).

t-критерій Стюдента розраховано за формулами (5.4) і (5.5), з огляду на дисперсію відносності, що розрахована за виразом (5.7), а Q-критерій Кохрена – за формулою (5.6): по чергово порівняно дисперсії середніх значень показників термопар під час експерименту в місці розташування кожної з 5 термопар з 2 дисперсіями інших експериментів для колони. Отримано 5 значень критерію.

Результати розрахунку критеріїв адекватності узагальнено в табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Параметри дисперсії результатів вогневих випробувань залізобетонних колон за результатами трьох експериментів

Зона термопари (рис. 5.23)	Максимальне відхилення, °С	Середнє відхилення, °С	Відносне відхилення, %	F-критерій	Критичне значення F-крит.	t-критерій	Критичне значення t-крит.	Q-критерій	Критичне значення Q-крит.
T1	23,8	7,1	4,0	2,26	4,49	1,50	2,92	0,31	0,45
T2	28,6	7,2	3,7	2,32		1,17		0,34	
T3	26,4	6,7	3,9	2,28		1,01		0,32	
T4	27,9	6,9	3,7	2,23		1,43		0,30	
T5	29,1	7,1	3,5	2,33		2,14		0,34	

Відповідно до таблиці 5.4, розраховані критерії адекватності (t-критерій Стьюдента, Q-критерій Кохрена, F-критерій Фішера) не перевищують критичних значень [181–183].

5.5.4. Перевірка адекватності під час випробування балок. Для з'ясування адекватності експериментальних результатів у ході випробування колон вибрано статистичні критерії, аналогічні до верифікації результатів випробування стін, колон та плит.

Результати розрахунку критеріїв адекватності узагальнено в табл. 5.5.

Таблиця 5.5

Параметри дисперсії результатів вогневих випробувань залізобетонних балок за трьома експериментами

Зона термопар (рис. 5.29)	Максимальне відхилення, °С	Середнє відхилення, °С	Відносне відхилення, %	F-критерій	Критичне значення F-крит.	t-критерій	Критичне значення t-крит.	Q-критерій	Критичне значення Q-крит.
T1	5,8	2,1	1,4	1,26	4,49	1,10	2,92	0,11	0,45
T2	8,6	2,2	1,7	1,32		1,14		0,12	
T3	46,4	17,7	7,9	2,88		1,51		0,33	
T4	47,9	16,9	6,7	2,93		1,63		0,31	
T5	61,1	26,1	7,5	3,13		1,94		0,36	
ТС1	21,1	9,4	3,5	1,56		1,28		0,21	
ТС2	22,3	9,8	3,8	1,61		1,31		0,22	
ТС3	24,6	9,7	3,7	1,60		1,32		0,24	

F-критерій Фішера розраховано за формулою (5.1). Дисперсія адекватності – відхилення між показниками конкретної термопары й середнього значення

температури в усіх трьох експериментах щодо місця замірювання температури за виразом (5.2).

Дисперсія відтворюваності розрахована як відхилення мінімальної та максимальної температури в місці розташування конкретної термопари за всіма дослідями, з огляду на похибку термопар за виразом (5.7). Почергово порівняно 8 значень дисперсії адекватності з дисперсією відтворюваності та розраховано критерій Фішера (F).

t-критерій Стьюдента розраховано за формулами (5.4) і (5.5), з огляду на дисперсію відносності, що розрахована за виразом (5.7), а Q-критерій Кохрена – за формулою (5.6): почергово порівняно дисперсії середніх значень показників термопар під час експерименту в місці розташування кожної з 8 термопари з 2 дисперсіями інших експериментів для балки. Отримано 8 значень критерію.

Згідно з таблицею 5.5, розраховані критерії адекватності (t-критерій Стьюдента, Q-критерій Кохрена, F-критерій Фішера) не перевищують критичних значень [181–183].

5.6. Висновки до розділу 5

У розділі обґрунтовано методики проведення експериментів із нагрівання кожного виду малогабаритних фрагментів залізобетонних будівельних конструкцій за стандартним температурним режимом пожежі без механічного навантаження. Визначено необхідні мінімальні розміри зразків і способи установлення їх у камеру печі. Відображено та проаналізовано результати випробувань фрагментів основних елементів залізобетонних конструкцій. Перевірено відтворюваність результатів. Сформульовано висновки.

Описано етапи створення малогабаритних фрагментів залізобетонних плит, стін, колон та балок із важкого бетону з армуванням. Габаритні розміри: плит – 1202×1198 мм; 1197×1193 мм; 1201×1199 мм; стін – 1193×1195 мм; 1198×1194 мм; 1201×1199 мм; колон – $200 \times 200 \times 998$ мм; $200 \times 200 \times 997$ мм; $200 \times$

200 × 997 мм; балок – 200 × 300 × 998 мм, 200 × 300 × 999 мм та 20 × 300 × 998 мм.

Виготовлено по три зразки кожного виду елементів будівельних конструкцій та витримано їх у спеціальному приміщенні впродовж не менш як 28 діб.

Створено методики проведення експериментів із нагрівання кожного виду з малогабаритних елементів залізобетонних будівельних конструкцій. Експерименти проведено в малогабаритній установці для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції, що описано в розділі 4, без механічного навантаження. Вивчено вплив стандартного температурного режиму пожежі під час нагрівання елемента з однієї (стіна, плита), трьох (балка) або чотирьох (колона) сторін. Для визначення температури в печі використано термопари ТХА-2388 із діаметром дроту 1,25 мм, які можна застосовувати для вимірювання температури в діапазоні від 0 до 1300 °С. Для визначення температури в аналізованому зразку застосовано термістор MF 52, придатний і для вимірювання температури в діапазоні від -30 до 300 °С.

Проведено 12 вогневих експериментальних досліджень впливу стандартного температурного режиму пожежі на фрагменти несучих залізобетонних будівельних конструкцій (три експерименти для кожного з видів конструкцій). Виявлено характерні для залізобетону процеси виділення вологи та пари. Отримано відомості щодо прогрівання, необхідні для проведення розрахункової частини.

Відповідно до проведених експериментів, на обігрівній поверхні досліджуваних фрагментів відбувається рівномірний розподіл температур. Для плити – під час нагрівання залізобетону простежуване виділення вологи й пари, що були всередині матеріалу. На обігрівальній поверхні цей процес відбувався з 15 до 25 хвилини, на необігрівальній – із 39 до 57 хвилини, на рівні арматури – із 31 до 55 хвилини. Прогрів конструкції на всіх рівнях був рівномірним у площинах розташування термопар. Максимальна температура на рівні арматури становила 200 °С, була простежувана на останній хвилині експерименту та лінійно зростала

після виходу з плато. Максимальна температура на необігрівальній поверхні сягнула 110 °С, була простежувана на останній хвилині експерименту та лінійно зростала після виходу з плато.

Для стіни – під час нагрівання залізобетону виявлено виділення вологи й пари, що були всередині матеріалу. На обігрівальній поверхні цей процес відбувався з 11 до 27 хвилини, на необігрівальній – із 40 до 55 хвилини, на рівні арматури – із 32 до 52 хвилини. Прогрів конструкції на всіх рівнях був рівномірним у площинах розташування термопар. Максимальна температура на рівні арматури становила 190 °С, була простежувана на останній хвилині експерименту та лінійно зростала після виходу з плато. Максимальна температура на необігрівальній поверхні дорівнювала 110 °С, була зафіксована на останній хвилині експерименту та лінійно зростала після виходу з плато.

Для колони – прогрів конструкції на всіх рівнях був рівномірним у площинах розташування термопар. Максимальна температура на поверхні становила 709 °С, була простежувана на останній хвилині експерименту та лінійно зростала. Максимальна температура в центрі колони сягнула 105 °С, була на останній хвилині експерименту та лінійно зростала.

Для балки – максимальна досягнута температура становила 806 °С, максимальна температура всередині балки – 480 °С, була простежувана на останній хвилині експерименту та лінійно зростала після виходу з плато. Максимальна температура на необігрівальній поверхні дорівнювала 159 °С, а на необігрівальній поверхні балки – 84 °С, зафіксована на останній хвилині експерименту та лінійно зростала після виходу з плато.

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

РОЗДІЛ 6

ОБҐРУНТУВАННЯ КОМПЛЕКСУ МЕТОДИК ОЦІНЮВАННЯ МЕЖІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

6.1. Методики оброблення експериментальних даних для оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних балок

6.1.1. Адекватність розрахунку температурного поля у фрагментах балок за результатами експериментальних досліджень. У розділі 2.2 проаналізовано й запропоновано методи апроксимації температурних розподілів на основі точкових замірів температури, що отримані внаслідок нагрівання залізобетонних балок за стандартним температурним режимом пожежі. Один із розглянутих методів – це підхід, у якому де рекомендований вираз (2.35), що визначається шляхом варіації показника ступеня параболи. Інший же передбачає використання лінійної інтерполяції між температурами сусідніх ізотерм для кожної поточної вузлової точки перерізу. Щоб побудувати криві розподілу температур, необхідно отримати дані контролю температури в точках, що зображені на рис. 5.29. Можливо використати моделі теплопередачі (2.1) – (2.4) із граничних умов III роду на граничні умови I роду, оскільки за експериментальними даними відомі температури на поверхні залізобетонної балки на кожній хвилині експерименту [284–300].

Часовий і просторовий кроки вибирають за умовою збіжності кінцево-різницевої схеми. Також за змоги часовий крок має дорівнювати 1 хв., відповідно до контрольного проміжку часу в ході високотемпературних випробувань. У процесі вибору кроків для балки варто зважати на тристоронній обігрів конструкції під час експериментів. Технічно завдання спрощене, оскільки можливо використовувати симетричну половину балки.

Для інтерполяції за обома способами використовують формулу (2.60). Для перевірки адекватності можливо порівняти зміну температури в середній частині фрагмента залізобетонної колони (рис. 5.23).

Відповідно до алгоритму, представленого в розділі 2.2, виконано розрахунки й побудовано залежності прогрівання в точках розміщення термопар усередині колони, на основі замірів температури на обігрівній стороні та всередині балки, від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі, а потім порівняно результати з експериментальними даними [284–300]. На рис. 6.1 порівняно графіки розрахункових та експериментальних даних.

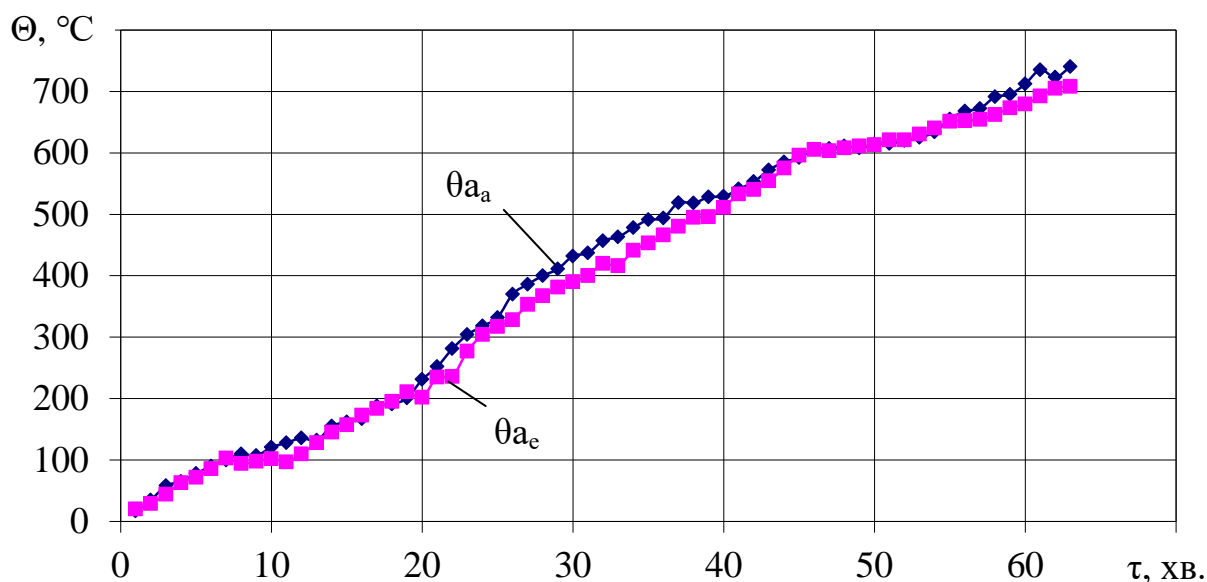


Рисунок 6.1 – Прогрів фрагмента залізобетонної балки в контрольній точці: θ_{a_a} – дані апроксимації; θ_{a_e} – середня температура відповідно до показників термопар під час експериментальних досліджень (рис. 5.29)

Аналіз графіків на рис. 6.1 засвідчив, що дані, отримані внаслідок застосування запропонованого методу інтерполяції, є достатньо точними, оскільки перебувають у межах експериментальної похибки. Для оцінювання того, наскільки якісно математична модель відтворює результати експериментів, необхідно отримати кількісні показники її адекватності. За допомогою виразів 5.1 – 5.6 визначено критерії Фішера, Стюдента та Кохрена [181–183].

У табл. 6.1 представлено результати розрахунків відносного відхилення та критеріїв адекватності, відповідно до даних експериментів і розрахунків.

Таблиця 6.1

Параметри дисперсії

Місце контролю температури рис. 5.12	Максимальне відхилення, °С	Середнє відхилення, °С	Відносне відхилення, %	F-критерій	Критичне значення F-крит.	t-критерій	Критичне значення t-крит.	Q-критерій	Критичне значення Q-крит.
$\theta_{a_c}; \theta_{a_a}$	19	10	2,1	1,1	4,49	1,1	2,92	0,14	0,45

Згідно з таблицею 6.1, розраховані критерії адекватності (t-критерій Стьюдента, Q-критерій Кохрена, F-критерій Фішера) не перевищують критичних значень.

6.1.2. Оцінювання межі вогнестійкості залізобетонної балки за результатами вогневих випробувань без механічного навантаження. У ході вогневих випробувань під час нагрівання залізобетонної балки без механічного навантаження за стандартним температурним режимом пожежі в малогабаритній вогневій печі отримано результати прогріву в точках, необхідних для розрахунку контрольних даних. Наступний етап – оцінювання розрахунковим способом вогнестійкості елемента конструкції за несучою здатністю.

Методика дає змогу на основі даних, одержаних у ході експериментальної частини (трестороннє нагрівання залізобетонної балки за стандартною температурною кривою пожежі у вогневій печі без механічного навантаження згідно з вимогами стандартів [2; 31]) проаналізувати межу вогнестійкості

залізобетонних балок прямокутного перерізу за несучою здатністю під час розрахунку на міцність (рис. 6.2).

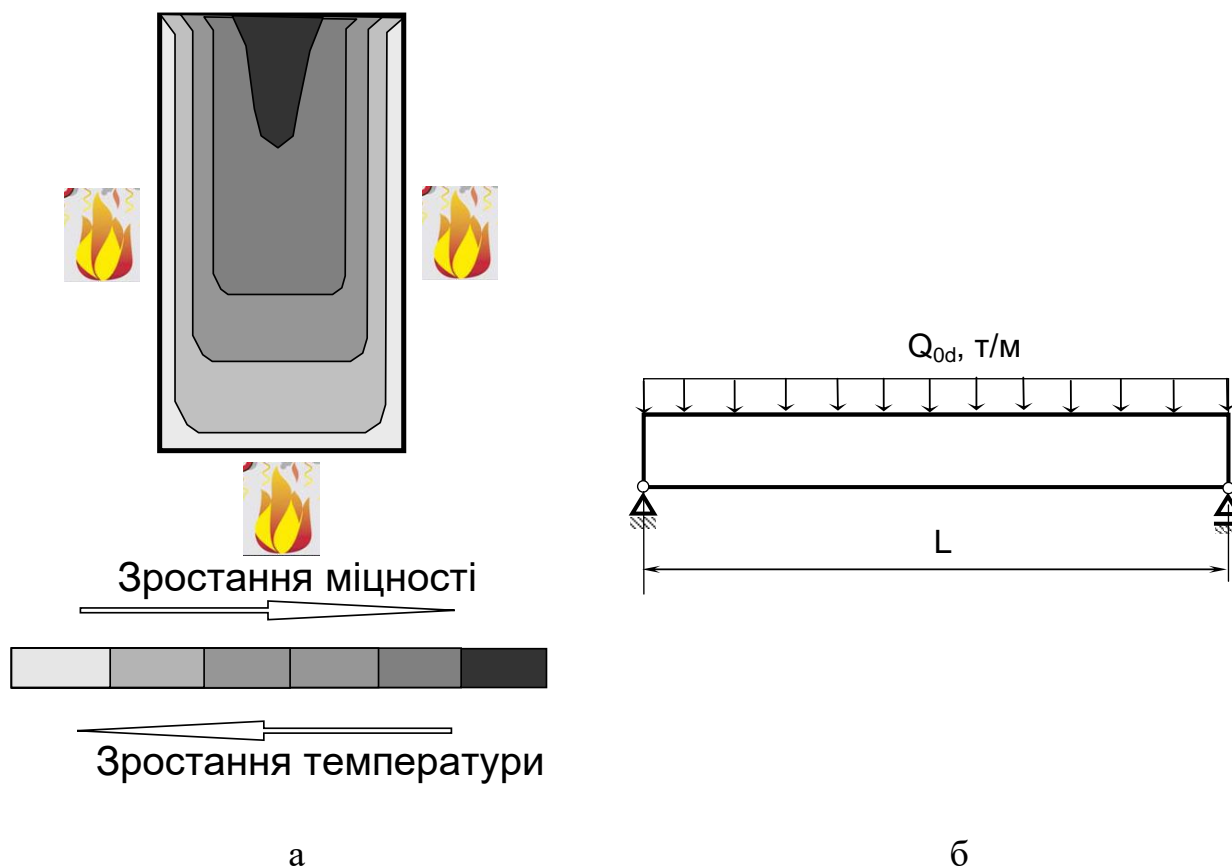


Рисунок 6.2 – Зміна міцності в перерізі балки залежно від температури (а) та розрахункова схема балки (б)

Загальна експериментально-розрахункова методика вможливує випробування балкових елементів будівельних конструкцій (балок, ригелів, перемичок, елементів ферм, рам, арок тощо) на вогнестійкість за температурним режимом згідно з [2] без прикладання механічного навантаження, що беруть до уваги на етапі розрахунку. Вхідні дані – експериментальні.

Методику використовують для визначення межі вогнестійкості балкових елементів будівельних конструкцій, що зазнають впливу вогню з трьох боків.

Метод охоплює зміни механічних властивостей кожного шару бетону й арматурної сталі, залежно від температури нагрівання. Принцип зміни механічних

властивостей бетону й арматурної сталі зображено на рис. 6.47-а. Зміну беруть до уваги під час аналізу параметрів напружено-деформованого стану в перерізі балки, відповідно до шарнірної схеми її закріплення, геометричних параметрів, класу міцності бетону та арматурної сталі. Рівняння, що описують напружено-деформований стан, узяті згідно з рекомендаціями EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2 [103].

Для вивчення зміни механічних властивостей залежно від температури використано інтерполяцію температур у вузлових точках перерізу під час застосування значень температур, що виміряні в контрольних точках перерізу в ході випробувань. На рис. 6.47-б представлено схему розбиття перерізу на прямокутні зони з вузловими точками, де визначені температури через інтерполяцію. На цьому рисунку запропоновано схему розташування контрольних точок, де буде визначена температура згідно з рекомендаціями стандарту [31].

На рис. 6.3 зображено розташування термопар і розбиття перерізу балки на зони. Оскільки балка нагрівається з трьох сторін, то для уникнення порушення її цілісності через встановлення термопар у схемі взято до уваги симетричність конструкції.

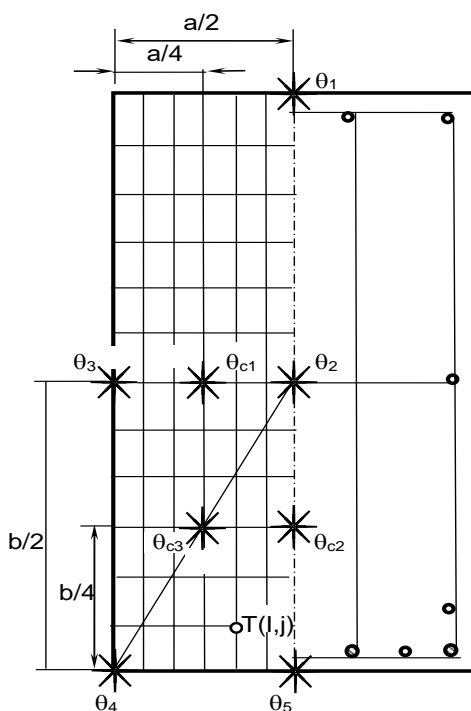


Рисунок 6.3 – Схема розташування місць контролю температури у перерізі зон балки

Спосіб інтерполяції полягає у виконанні низки процедур.

1. За показниками термопар θ_{1-5} , θ_{c1-c3} знайти вираз, який апроксимує залежність температури від вертикальної координати вздовж поздовжньої осі перерізу для кожного контрольного моменту часу k . Вираз має такий вигляд:

$$\theta_{k,i} = \theta_k + (\theta_{i,k} - \theta_{(i-1)k}) \left[\frac{i}{m} \right]^{Q_{v_k}} \quad (6.1),$$

Q_{v_k} – показник ступеня, що визначають через мінімізацію середньоквадратичної нев'язності з використанням виразу:

$$\Phi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m [\theta_{iM} - \theta_{iE}]^2 \rightarrow \min \quad (6.2),$$

де m – кількість просторово-часових контрольних точок;

θ_{iE} , θ_{iM} , – експериментальне й розраховане значення температури в i -тій просторовій контрольній точці в контрольний момент часу k .

2. Задати початкові параметри функції, що наближує ізотерму, яка має такий вигляд:

$$j = x_0 \left(1 - \left(\frac{i}{x_0} \right)^{p_0 - (p_{\max} - p_0)x_0^n} \right)^{\frac{1}{p_0 - (p_{\max} - p_0)x_0^n}} \quad (6.3),$$

де $p_0 = 1,8$, $p_{\max} = 15$ мінімальний і максимальний показники ступеня функції, що апроксимує ізотерми;

x_0 – початкове значення координати i функції, що апроксимує ізотерми;

$n = n_0$ – параметр для пошуку в разі наближення поверхні для інтерполяції температур у вузлових точках.

3. У кожній контрольній точці визначити x_0 через розв'язування виразу (6.3) як рівняння за відомих значень i, j . За отриманим значенням x_0 фіксують температуру в контрольній точці за виразом (6.1).

4. Варіюючи параметр n , визначити таке його значення, за якого вираз (6.2) досягає мінімуму. Алгоритм пошуку мінімуму заснований на методі Ньютона.

5. Із застосуванням описаного алгоритму знайти значення температур у вузлових точках перерізу в кожний контрольний момент часу випробування.

6. У кожній зоні визначити середню температуру за чотирма вузловими точками.

7. Температури в арматурних стержнях, де не відбувалося вимірювання, визначають за алгоритмом, як і для будь-якої вузлової точки перерізу.

Задачу міцності розв'язують з огляду на величину максимального прогину балки, яку оцінюють за формулою:

$$D = \frac{L^2}{400 \cdot b} \quad (6.4)$$

Відповідно до цього значення максимального прогину визначають максимальну кривизну за формулою:

$$\chi = \frac{48D}{5L^2} = 24 \cdot 10^{-3} b^{-1} \quad (6.5).$$

За відомими найбільшою кривизною, середніми значеннями температури кожної зони й температури арматурних стержнів, а також координатами зони та центру перерізу арматурного стержня визначають середні напруження кожної із зон й арматурних стержнів за діаграмами «напруження – деформація», що рекомендовані EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2 [103]. Діаграми деформування бетону залежно від температури нагрівання подано на рис. 6.4 і побудовано за формулами:

$$\text{при } 0 < \varepsilon_b \leq \varepsilon_{c1,T}, \sigma_b(\varepsilon_b) = \frac{3\varepsilon_b R_{b,T}}{\varepsilon_{c1,T} \left(2 + \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{c1,T}} \right)^3 \right)}, \quad (6.6),$$

$$\text{при } \varepsilon_{c1,T} < \varepsilon_b < \varepsilon_{cu1,T}, \sigma_b(\varepsilon_b) = R_{b,T} - \frac{R_{b,T}(\varepsilon_b - \varepsilon_{c1,T})}{\varepsilon_{b2} - \varepsilon_{c1,T}}$$

де ε_b – відносна деформація бетону;

$R_{b,T}$ – розрахунковий опір бетону на стискання, залежний від температури нагрівання бетону;

$\varepsilon_{c1,T}$ – гранична відносна деформація гілки зростання діаграми (див. рис. 6.4);

$\varepsilon_{cu1,T}$ – найбільша відносна деформація діаграми (див. рис. 6.4).

Діаграми деформування арматурної сталі залежно від температури нагріву подано на рис. 6 і побудовані за формулами:

$$\begin{aligned} \text{при } 0 < \varepsilon_s < \varepsilon_{sp} & \quad \sigma_s = E_{s,T} \varepsilon_s \\ \text{при } \varepsilon_{sp} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} & \quad \sigma_s = R_{sp,T} - k + (p/q) [q^2 - (\varepsilon_{sy} - \varepsilon_s)^2]^{0,5}, \\ \text{при } \varepsilon_{sy} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{st} & \quad \sigma_s = R_{s,T}, \\ \text{при } \varepsilon_{st} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su2} & \quad \sigma_s = R_{s,T} [1 - (\varepsilon_s - \varepsilon_{st}) / (\varepsilon_{s0} - \varepsilon_{st})], \\ \text{при } \varepsilon_{su2} < \varepsilon_s & \quad \sigma_s = 0 \end{aligned} \quad (6.7),$$

де q, p, k – деякі параметри, що визначають за формулами:

$$\begin{aligned} q^2 &= (\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp})(\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp} + k/E_{s,T}), \quad p^2 = k(\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp})E_{s,T} + k^2 \\ k &= \frac{(R_{s,T} - R_{sp,T})^2}{(\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp})E_{s,T} - 2(R_{s,T} - R_{sp,T})} \end{aligned} \quad (6.8).$$

До формули (7), (8) входять такі параметри:

$\varepsilon_{sp} = R_{sp,T}/E_{s,T}$ – деформація, за якої настає межа пропорційності;

$\varepsilon_{sy} = 0,02$ – деформація, за якої настає межа текучості;

$\varepsilon_{st} = 0,15$ – деформація, за якої починається спадна гілка діаграми;

$\varepsilon_{su2} = 0,2$ – найбільша деформація;

$R_{sp,T}$ – межа пропорційності сталі, $R_{s,T}$ – межа міцності сталі;

$E_{s,T}$ – модуль пружності сталі, залежний від температури нагрівання.

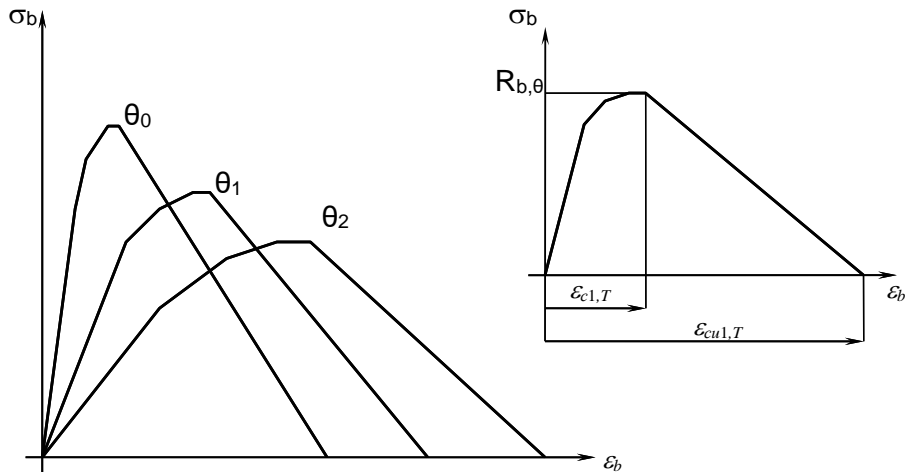


Рисунок 6.4 – Механічні властивості бетону за високих температур

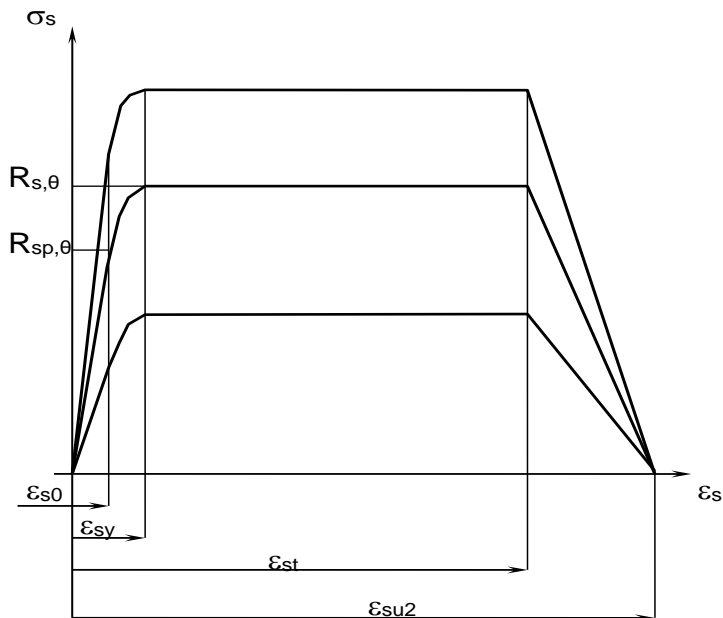


Рисунок 6.5 – Механічні властивості арматурної сталі за високих температур

За відомими напруженнями кожної із зон перерізу балки та арматурних стержнів визначають момент, за якого досягають критичної кривизни балки з використанням формули:

$$M_{\text{lim},fi} = \sum_{i=1}^z \sigma_{si}(\theta, \varepsilon_{si}) A_{si} \cdot \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{bi,j}(\theta, \varepsilon_{bi,j}) A_{bi,j} d_{bi,j} + \sum_{i=1}^l \sigma_{sdi}(\theta, \varepsilon_{sdi}) A_{sdi} d_{sdi}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{bi,j}(\theta, \varepsilon_{bi,j}) A_{bi,j} + \sum_{i=1}^l \sigma_{sdi}(\theta, \varepsilon_{sdi}) A_{sdi}} \quad (6.9),$$

де $\sigma_{bi,j}(\theta, \varepsilon_{bi,j})$ – напруження в бетоні, що визначають за формулами (6), для середнього значення температури поточної зони бетону в перерізі; $\sigma_{si}(\theta, \varepsilon_{si})$, $\sigma_{sdi}(\theta, \varepsilon_{sdi})$ – напруження в робочій і додатковій арматурі, що визначають за формулами (6.7), (6.8); $d_{bi,j}$, d_{sdi} – відстані відповідно від центрів зон бетону перерізу, осей додаткових арматурних стержнів до осі, що проходить через центри робочої арматури, причому для стержнів нижче від горизонтальної центральної осі відстань має від'ємне значення. Деформації: $\varepsilon_{bi,j} = x_{bi,j} \cdot \chi$, де $x_{bi,j}$ – відстань центру зони до горизонтальної центральної осі перерізу; $\varepsilon_{sdi} = x_{sdi,j} \cdot \chi$, де $x_{sdi,j}$ – відстань осі додаткового арматурного стержня до горизонтальної центральної осі перерізу; $\varepsilon_{si} = x_{si,j} \cdot \chi$, де $x_{si,j}$ – відстань осі робочого арматурного стержня до горизонтальної центральної осі перерізу; $A_{bi,j}$ – площа зон, на які розбитий переріз балки, A_{sdi} , A_{si} – площі поперечних перерізів стержнів робочої та додаткової арматури.

За формулою (6.9) побудовано графік залежності внутрішнього моменту від кривизни балки. Під час побудови графіка фіксують момент із найбільшим значенням, що вважають максимальним моментом, який балка здатна витримувати в контрольний момент часу випробування.

За отриманими значеннями будують графік залежності максимального моменту від часу випробування. Поточне значення максимального моменту

випробовуваної балки, в залежності від наявного моменту сили, визначають за формулою настання граничного стану втрати несучої здатності:

$$M_{0d} = Q_{0d}L^2/8 \quad (6.10).$$

Для оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних балок за результатами нагрівання в спеціальній малогабаритній вогневій печі необхідні такі дані: показники термопар у кожную хвилину випробувань згідно зі схемою на рис. 6.3; клас міцності бетону та арматури; тип крупного заповнювача бетону; діаметри арматури, а також кількість і розташування стержнів, що зображено на рис. 6.6. Далі фіксують дані щодо геометричних розмірів перерізу балки й захисний шар бетону, розрахункову довжина балки та розрахункове розподілене навантаження (рис. 6.2-б).

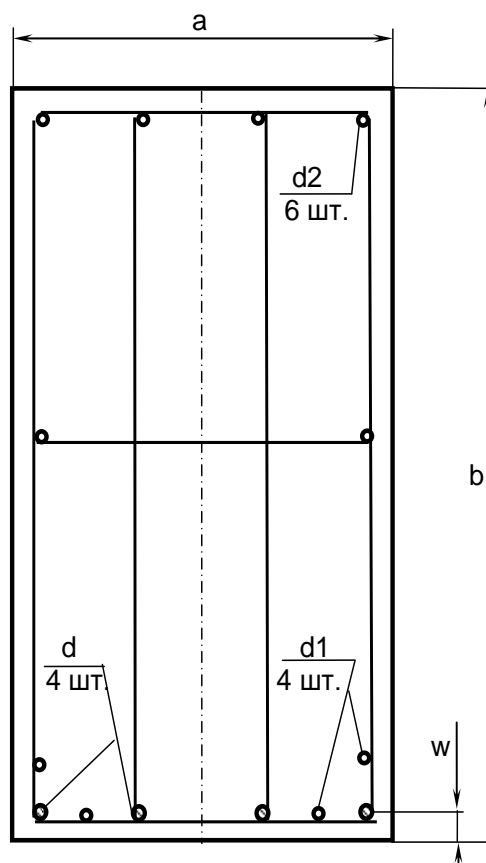


Рисунок 6.6 – Схема розташування та діаметри арматури балки

На рис. 6.7 подано лістинг сторінки введення початкових даних, а на рис. 6.8 – лістинг сторінки результатів

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	Діагональ	Вертикаль		Горизонталь		Свойства бетона		Свойства арматури		Свойства арматури		Свойства арматури		Геометрические размеры		Геометрические размеры		Распределенная
2	Таб. °С	Таб. °С	Таб. °С	Таб. °С	Таб. °С	Таб. °С	Таб. °С	Класс прочности	Тип	Класс прочности	Диаметр d1, м	Диаметр d2, м	Ширина a, м	Высота b, м	Длина L, м	Толщина защитного слоя w, м	Толщина защитного слоя w, м	Нагрузка, q, т/м
3	22	22	22	22	22	22	22	C 20/25	1 А400С	1 А400С	0,016	0,016	0,2	0,3	4,75	0,025	0,025	1,5
4	22	22	22	22	22	22	22											
5	22	120	122	22	22	112	22											
6	22	185	189	22	22	177	22											
7	22	209	212	22	22	201	22											
8	22	264	267	22	23	256	22											
9	22	287	292	23	23	279	22											
10	22	341	324	23	24	312	22											
11	23	367	344	23	24	331	23											
12	23	379	369	24	25	357	23											
13	23	392	382	24	25	369	23											
14	25	399	395	25	26	382	25											
15	25	405	401	25	27	389	25											
16	25	411	410	25	27	395	25											
17	26	418	416	26	27	401	26											
18	27	429	422	26	27	408	27											
19	28	432	436	27	27	419	28											
20	29	442	447	27	27	429	29											
21	29	451	453	28	27	438	29											
22	29	460	463	30	28	447	29											
23	31	464	469	32	28	451	30											
24	45	471	477	35	28	458	31											
25	54	477	478	45	28	464	32											
26	71	481	483	56	28	468	36											
27	84	484	484	65	29	471	46											
28	95	486	486	88	29	473	52											
29	121	503	499	99	29	486	58											
30	147	517	513	112	29	500	63											
31	160	524	520	135	30	507	69											
32	175	533	529	158	30	516	75											
33	186	544	540	179	31	527	81											
34	203	552	548	201	32	535	89											
35	219	560	556	221	33	543	95											
36	234	568	564	243	34	551	101											
37	247	587	576	268	36	563	118											
38	260	595	584	289	40	571	127											
39	274	604	593	294	43	580	141											
40	298	613	602	308	46	589	157											
41	310	618	607	316	47	594	163											
42	327	622	611	323	49	598	179											
43	345	630	619	327	51	606	192											
44	368	646	635	334	57	622	208											
45	374	659	648	345	62	635	221											
46	379	671	660	356	68	647	234											
47	383	683	672	360	75	659	250											
48	387	699	704	367	82	668	267											

Рисунок 6.7 – Сторінка введення початкових даних

Межа вогнестійкості балки $\Phi_{MB} = 59$

Ресурс несучої здатності балки

Графік зниження несучої здатності балки

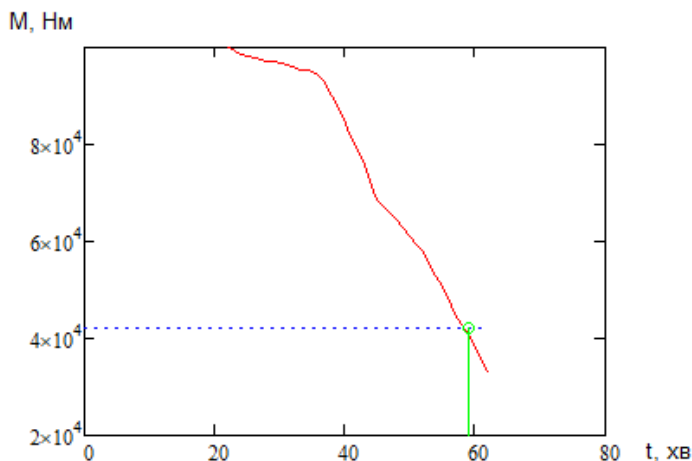


Рисунок 6.8 – Сторінка виведення результатів

6.1.3. Результати використання запропонованого методу. Варто проаналізувати конкретний приклад залізобетонної балки. На рис. 6.9 зображено вигляд перерізу балки та схему його армування, відповідно до запропонованих у методиці (рис. 6.3 і рис. 6.6).

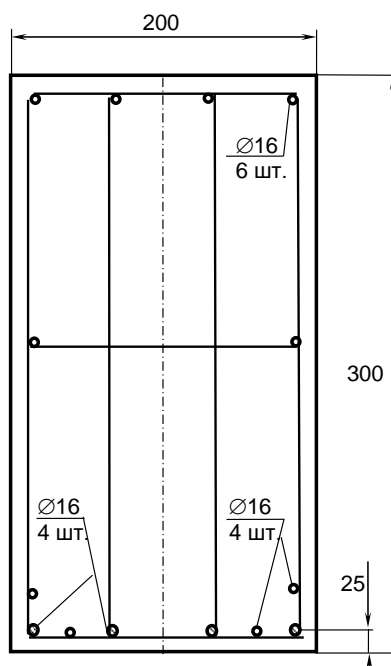


Рисунок 6.9 – Параметри перерізу балки

Основні параметри залізобетонної балки

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Геометричні розміри			
– висота	b	0,3	м
– ширина захисного шару	w	0,025	
– ширина	a	0,2	
– довжина балки	L	4,75	
Тип бетону	Важкий. На заповнювачі гранітному	Клас С 20/25 (В30)	
Густина бетону	ρ_b	2230	кг/м ³
Робоча арматура:		Клас А500С	м
– діаметр більший	d_1	0,016	
– діаметр менший	d_2	0,016	
Додаткова арматура:		Клас А500С	м
– діаметр	d_3	0,016	

Після інтерполяції отримано розподіли температур, що представлено на рис. 6.10.

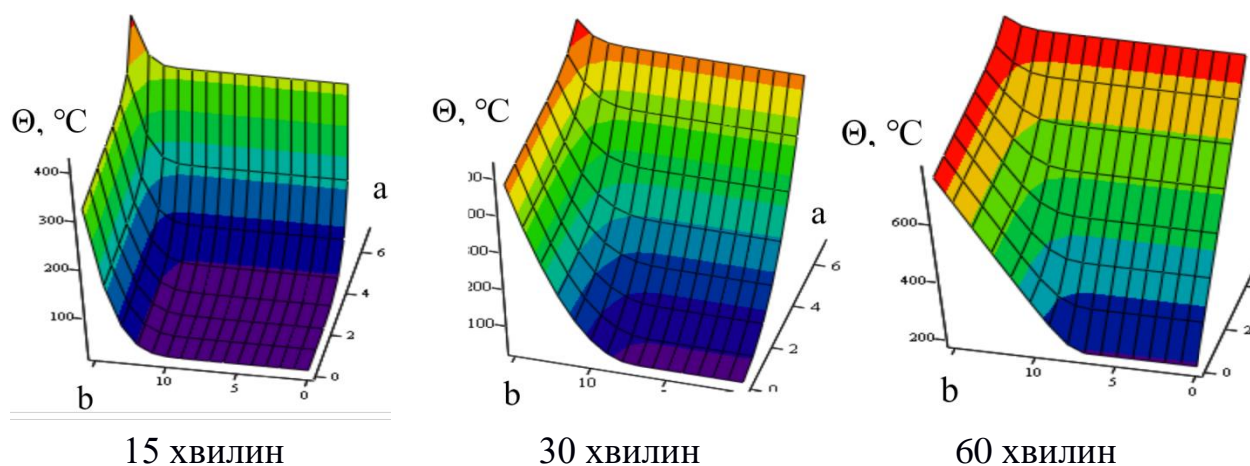


Рисунок 6.10 – Результати інтерполяції температур за значеннями температур у контрольних точках перерізу

Під час інтерполяції взято результати розрахунку теплової задачі для перерізу залізобетонної балки, згідно з рекомендаціями EN 1992-1-2:2005

Eurocode 2 [103]. Відповідно до рекомендацій EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2 [103], а також даних таблиці 6.2 побудовано міцнісні характеристики бетону й арматурної сталі, що зображено на рис. 6.11.

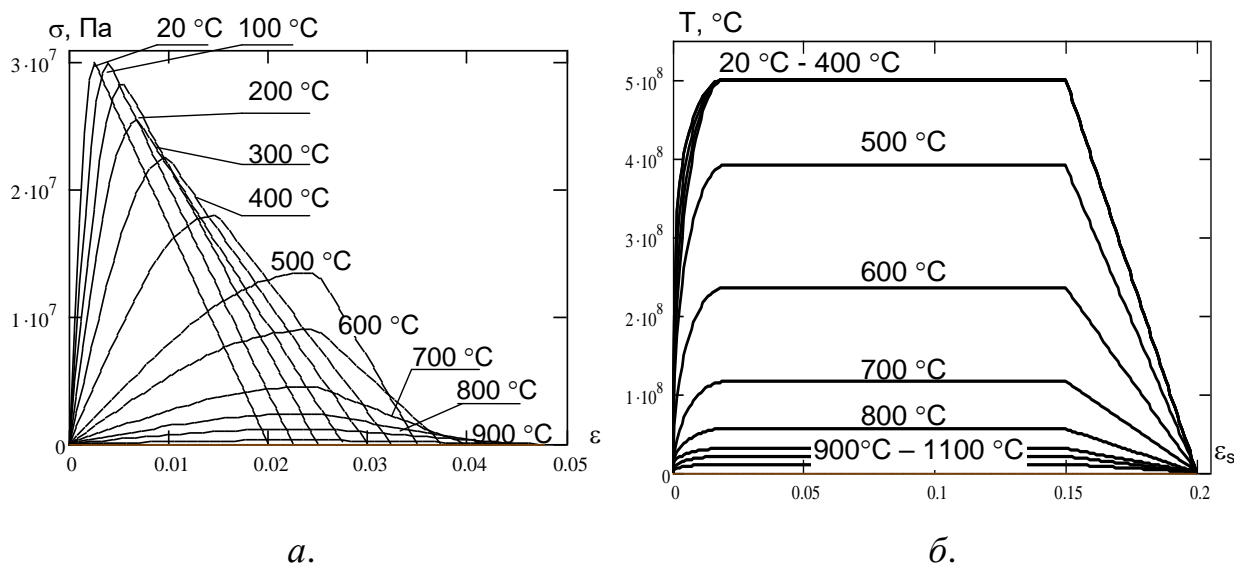


Рисунок 6.11 – Діаграми деформування бетону (а) та арматурної сталі (б)

Переріз балки був розбитий на прямокутні зони розміром $5 \times 4,5$ мм.

Граничний максимальний прогин балки становить:

$$D = \frac{L^2}{400 \cdot b} = \frac{4^2}{400 \cdot 0,9} = 0,044 \text{ м.}$$

Гранична кривизна балки дорівнює:

$$\chi = 24 \cdot 10^{-3} \cdot 0,9^{-1} = 0,0027 \text{ м}^{-1}$$

За формулою (6.12) у кожен контрольний момент часу побудовано графіки залежності внутрішнього моменту від кривизни балки та з'ясовано їхні максимальні значення. На рис. 6.12 побудовано графіки для деяких моментів часу випробування відповідно [103].

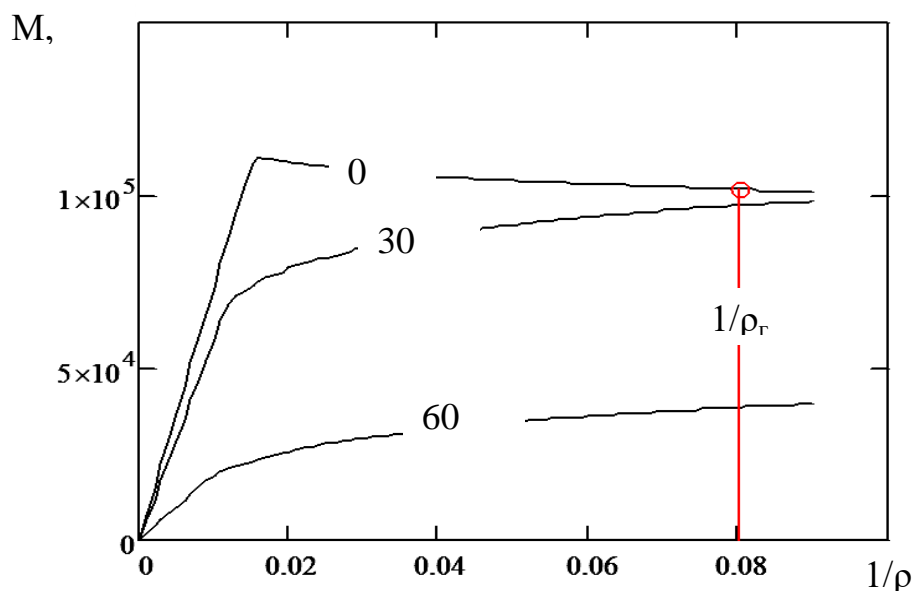


Рисунок 6.12 – Графіки моменту за граничного значення кривизни для заданих моментів часу випробування

За отриманими значеннями максимальних моментів був побудований графік зниження несучої спроможності, що подано на рис. 6.13.

Унаслідок розрахунку визначено межу вогнестійкості, що становила 59 хв.

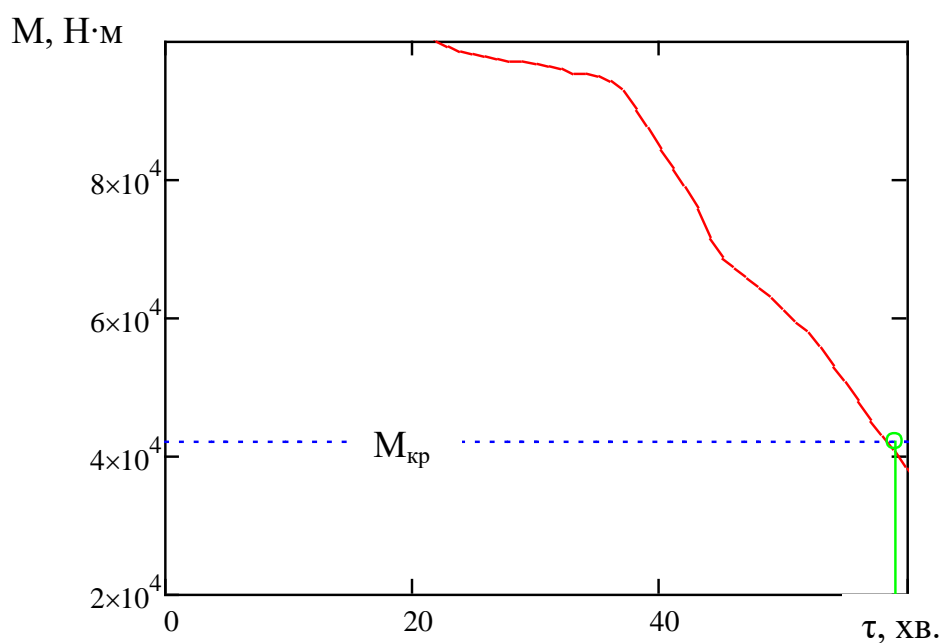


Рисунок 6.13 – Графік зниження несучої спроможності балки довжиною 4,75 м із навантаженням 1,5 т/м

На рис. 6.13 представлено отримані результати. Дані балки увідповіднені з характеристиками досліджуваного зразка та з температурами прогрівання її шарів під час експерименту. Додатково введено відомості щодо довжини виробу й розподіленого навантаження, що запроєктоване в ході роботи конструкції в будівлі. Після їх зміни можливо визначити межу вогнестійкості для колон інших габаритів та з іншим робочим навантаженням. На рис. 6.13 продемонстровано зниження міцності балки довжиною 4,75 м із зовнішнім навантаженням 1,5 т/м.

Для наочності на рис. 6.14 продемонстровано графік зниження несучої спроможності балки з навантаженням 2.5 т/м.

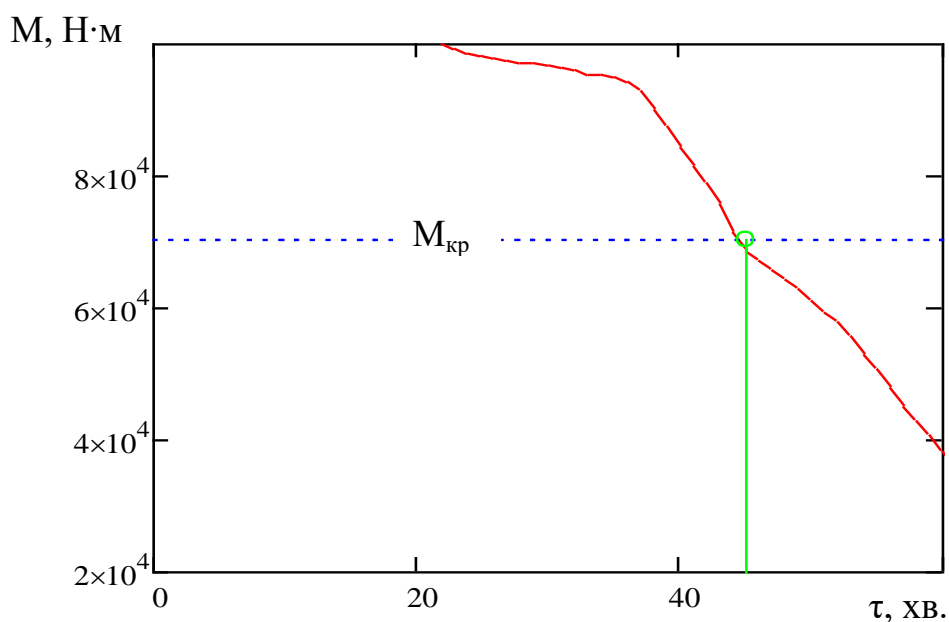


Рисунок 6.14 – Графік зниження несучої спроможності балки довжиною 4,75 м із навантаженням 2,5 т/м

Згідно з рисунками 6.13 і 6.14, за збільшення робочого навантаження на залізобетонну балку з 1,5 до 2,5 МПа її межа вогнестійкості знизилася з 59 до 45 хв., що підтверджує достовірність розрахунків. Варто порівняти отримані результати й дані, опубліковані в працях [136–139].

6.1.4. Порівняльний аналіз оцінювання межі вогнестійкості балки.

Порівняно результати, отримані за запропонованим методом, з експериментальними даними, що описані в літературі. Одержано величини можливих похибок.

Додатково виконано розрахунок межі вогнестійкості балки аналогічного перерізу довжиною 3 м із навантаження 1,5 т/м. Результати розрахунку представлено на рис. 6.15.

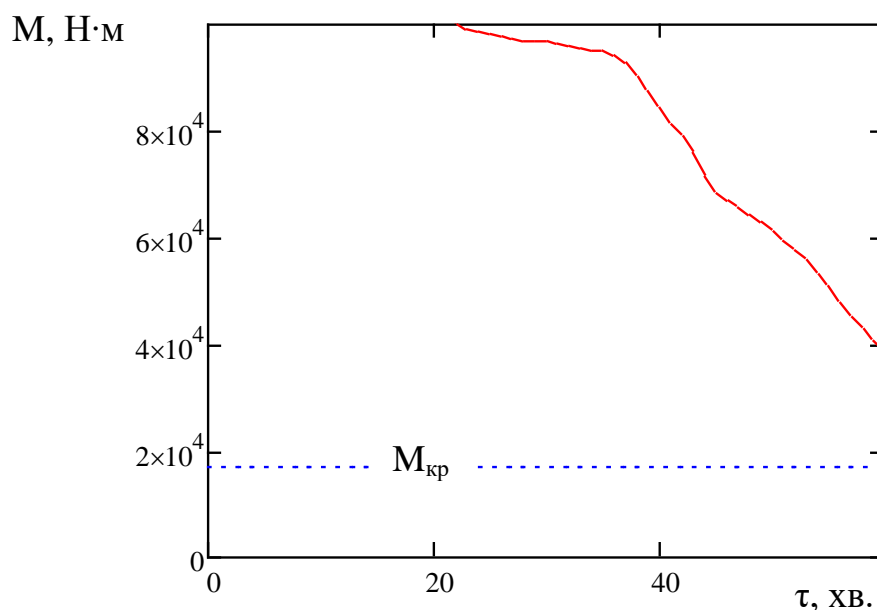


Рисунок 6.15 – Графік зниження несучої спроможності балки довжиною 3 м із навантаженням 1,5 т/м

Відповідно до рисунка 6.15, за 60 хвилин не досягнуто межі вогнестійкості балки досліджуваного перерізу, довжиною 3 м. Унаслідок інтерполяції результатів, отримано значення – 76 хвилин. Доцільно зіставити дані розрахунків з експериментально отриманими відомостями у вогневих печах.

Для аналізу використано залізобетонну балку $200 \times 300 \times 3000$ із важкого бетону на гранітному заповнювачі. Робоча арматура А400С, поперечна арматура А240С (рис. 6.15). Геометричні параметри взято з [136].

У монографії описано дані випробувань залізобетонних виробів, зокрема балки, для різних класів міцності бетону, різних діаметрів арматури та різних товщин захисного шару за розподіленого навантаження, що діє, і геометричних розмірів балок та ригелів.

На підставі всіх відомостей виконано розрахунок за розробленим алгоритмом із використанням експериментальних даних із монографії [136], де описано температури й параметри випробовуваних колон. Порівняльні дані результатів розрахунку та експерименту зображено в табл. 6.3.

Таблиця 6.3

Дані аналізу адекватності результатів розрахунку за розробленим методом

Захисний шар бетону, мм	Характеристики бетону		Характеристики арматури		Розподільне навантаження, т/м	Відхилення температури середини балки, %	Межа вогнестійкості, що отримано експериментально, хв.	Розрахункова межа вогнестійкості, хв.	Відносне відхилення, %
	Тип	Клас міцності	Клас міцності	Діаметр, мм					
35	1	C20/25	A400	16	1,5	9	84	76	9,5

Дані, отримані під час експериментального визначення, та відомості експериментально-розрахункового методу відрізняються на 9,5 %. Це вмотивоване тим, що балки були виготовлені з використанням різних матеріалів (пісок, вода, щебінь та в'яжуче), відрізнялися якістю і походженням. Проте кількісний показник межі вогнестійкості засвідчує високу збіжність результатів. Крім того, у ході експериментальних досліджень межа вогнестійкості не була нижчою, що також доводить перспективність розрахункової методики.

6.2. Методики оброблення експериментальних даних для оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних плит

6.2.1. Адекватність розрахунку температурного поля у фрагментах плит за результатами експериментальних досліджень. У розділі 2.2 проаналізовано й розроблено методи апроксимації температурних розподілів на основі точкових замірів температури в елементі залізобетонної плити за даними експериментів. Використано метод, заснований на інтерполяції температурних полів у перерізі конструкції, без вимірювань усередині зразків. Оскільки відбувався односторонній прогрів плити, як і в разі зі стіною, щоб побудувати криві розподілу температур, достатньо отримати дані температури тільки на обігрівальній і необігрівальній поверхнях плити. Такого результату досягають через заміну в моделі теплопередачі (2.1) – (2.4) із граничних умов III роду на граничні умови I роду [301–304].

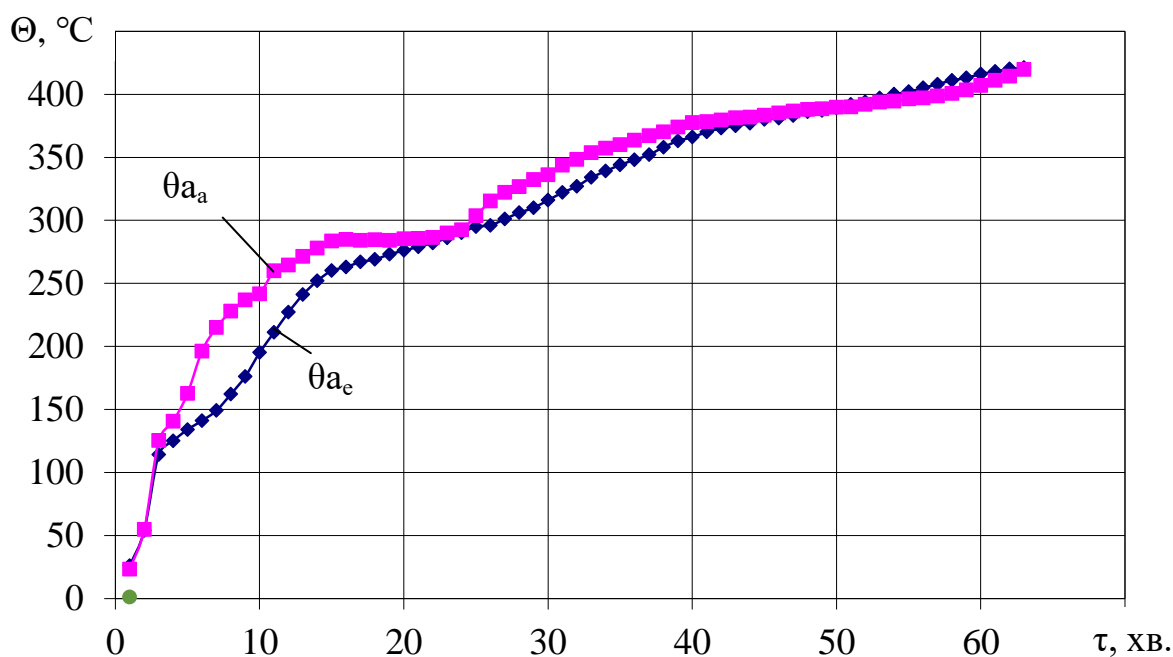


Рисунок 6.16 – Прогрів фрагмента залізобетонної плити на рівні арматури: θ_{a_a} – дані апроксимації; θ_{a_e} – середня температура відповідно до показників термопар під час експериментальних досліджень (рис. 5.16)

За допомогою математичних виразів (2.12) – 2.13) і даних, зазначених у таблиці 2.2, як і в разі з балкою (розділ 6.1), необхідно перевіряти адекватність отриманих результатів. Для цього організовано контроль зміни температури в середній частині фрагмента залізобетонної стіни (рис. 5.13) та на рівні арматури всередині конструкції (рис. 5.11).

Відповідно до алгоритму, представленого в розділі 2.2, виконано розрахунки й побудовано графіки прогрівання в точках розміщення термопар усередині плити, на основі замірів температури на обігрівній і необігрівній сторонах, а потім порівняно результати з експериментальними даними. На рис. 6.16 і 6.17 представлено порівняння графіків розрахункових та експериментальних даних [301–304].

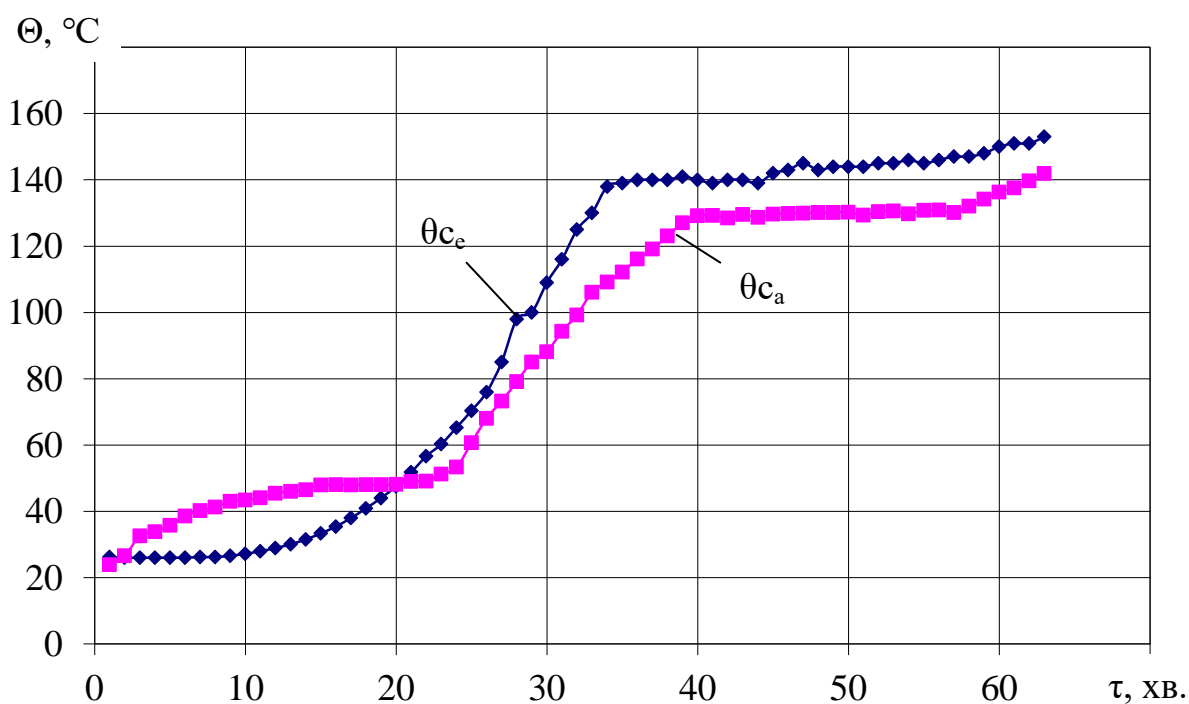


Рисунок 6.17 – Прогрів фрагмента залізобетонної плити на 110 мм (середина конструкції): $\theta_{с_а}$ – дані апроксимації; $\theta_{с_е}$ – середня температура відповідно до показників термопар під час експериментальних досліджень (рис. 5.16)

Аналіз графіків на рис 6.14 і рис. 6.15 засвідчив, що дані, отримані внаслідок застосування запропонованого методу інтерполяції, є достатньо точними, оскільки перебувають у межах експериментальної похибки. Для оцінювання того, наскільки якісно математична модель відтворює результати експериментів, необхідно отримати кількісні показники її адекватності. За допомогою виразів 5.1 – 5.6 визначено критерії Фішера, Стьюдента та Кохрена.

У табл. 6.4. представлено результати розрахунків відносного відхилення та критеріїв адекватності, відповідно до даних експериментів і розрахунків.

Таблиця 6.4

Параметри дисперсії

Зона термопари (рис. 6.3 – рис. 6.4)	Максимальне відхилення, °С	Середнє відхилення, °С	Відносне відхилення, %	F-критерій	Критичне значення F- крит. [181]	t-критерій	Критичне значення θ - крит. [181]	Q-критерій	Критичне значення Q- крит. [181]
$\theta_{a_e}; \theta_{a_a}$	66	16	4,1	1,8	4,49	1,3	2,92	0,31	0,45
$\theta_{c_e}; \theta_{c_a}$	29	13	6,9	1,6		1,4		0,42	

Згідно з таблицею 6.4, розраховані критерії адекватності (t-критерій Стьюдента, Q-критерій Кохрена, F-критерій Фішера) не перевищують критичних значень [181].

6.2.2. Оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних плит за результатами вогневих випробувань без механічного навантаження. У ході вогневих випробувань під час нагрівання залізобетонних плит без механічного навантаження за стандартним температурним режимом пожежі в малогабаритній вогневій печі отримано результати прогріву в необхідних контрольних точках для

розрахунку. Наступний етап – оцінювання розрахунковим способом вогнестійкості елемента конструкції за несучою здатністю.

Методика дає змогу на основі даних, одержаних у ході експериментальної частини, що заснована на односторонньому нагріванні залізобетонної стіни за стандартною температурною кривою пожежі у вогневій печі без механічного навантаження, згідно з вимогами стандартів [2; 33], оцінити межу вогнестійкості залізобетонних стін за несучою здатністю під час розрахунку на міцність (рис. 6.18).



Рисунок 6.18 – Розрахункова схема моделі теплопередачі під час нагрівання ПЛИТ

Загальна експериментально-розрахункова методика дає змогу випробовувати елементи плит будівельних конструкцій на вогнестійкість за температурним режимом, згідно з [2], без прикладання механічного навантаження, що беруть до уваги на етапі розрахунку. Вхідні дані – експериментальні.

Методику використовують для визначення межі вогнестійкості елементів плит будівельних конструкцій, що зазнають впливу теплового потоку за одностороннього обігріву.

На рис. 6.19 зображено розташування термопар і розбиття перерізу плити на зони.

Метод дає змогу проаналізувати зміни механічних властивостей кожного шару бетону й арматурної сталі, залежно від температури нагрівання. Схему

обігріву плити продемонстровано на рис. 6.18. Зміну міцності залізобетонного елемента беруть до уваги для вивчення параметрів напружено-деформованого стану в перерізі стіни, відповідно до шарнірної схеми закріплення, геометричних параметрів, класу міцності бетону й арматурної сталі. Рівняння, що описують напружено-деформований стан, узяті відповідно до рекомендацій EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2 [103]. Для аналізу зміни механічних властивостей залежно від температури використано інтерполяцію температур у вузлових точках перерізу під час застосування значень температур, які виміряні в контрольних точках перерізу в ході випробувань.

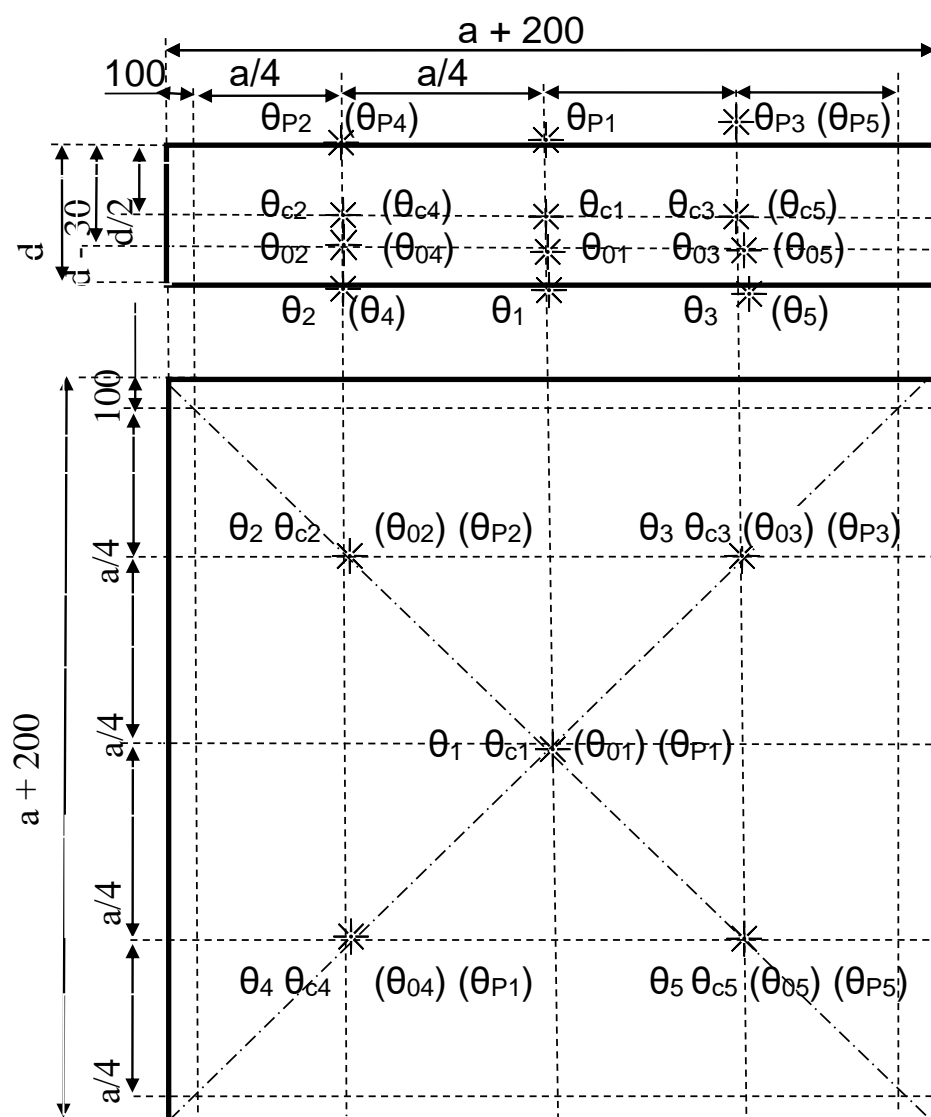


Рисунок 6.19 – Схема розташування термопар і розбиття перерізу плити на зони

У більшості наукових праць для теплотехнічного розрахунку залізобетонних плит під час їхньої роботи в умовах вогневого впливу пожежі запропоновано узагальнений інженерний підхід, ґрунтований на таких положеннях [166–169]:

1) для розрахунку використовують квазілінійне параболічне рівняння теплопровідності з граничними умовами (ГУ) III роду, у ході вивчення конвекційного та радіаційного теплообміну із середовищем пожежі;

2) температурний режим середовища пожежі визначають за стандартною температурною кривою пожежі [2];

3) з огляду на велику різницю теплопровідностей арматурної сталі й бетону, на теплообмін зважають тільки в бетоні;

4) теплофізичні характеристики (ТФХ) бетону представлені температурними залежностями згідно з [103];

5) рівняння теплопровідності розв'язують із застосуванням методу кінцевих елементів (МКЕ), із використанням комп'ютерної системи «ANSYS Mechanical».

Рівняння теплопровідності має такий вигляд [69–77; 81]:

$$c_p(\theta)\rho(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial t} = \nabla(\lambda(\theta)\nabla\theta) \quad (6.11),$$

де $\rho(\theta)$ – густина;

$c_p(\theta)$ – питома теплоємність;

$\lambda(\theta)$ – коефіцієнт теплопровідності, залежний від температури T .

Для розв'язання рівняння теплопровідності використано граничні умови III роду [113]:

$$-\lambda(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial r} = \alpha(\theta_p - \theta_w) \quad (6.12),$$

де θ_p – температура пожежного середовища в пристінковому шарі;

θ_W – температура поверхні елемента;

α – коефіцієнт теплообміну.

Коефіцієнт теплообміну бере до уваги дію конвекції та інфрачервоного випромінювання. За спрощеного підходу коефіцієнт теплообміну дорівнює:

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_k \quad (6.13),$$

де α_p – коефіцієнт теплообміну випромінюванням.

Відповідно до рекомендацій [25; 26]. конвективний і радіаційний складники можна визначити з виразів:

$$\begin{aligned} \alpha_k &= 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \text{ – обігрівна поверхня;} \\ \alpha &= 9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \text{ – необігрівна поверхня;} \end{aligned} \quad (6.14),$$

$$\alpha_p = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{\theta_W^4 - \theta_P^4}{\theta_W - \theta_P}$$

де $\varepsilon_c = 0.7$ – ступінь чорноти поверхні бетону [25; 26];

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ – константа Стефана – Больцмана.

Температуру пожежного середовища визначають стандартною температурною кривою пожежі згідно з формулою (1.1).

Таблиця 6.5

Параметри граничних умов для залізобетонної плити

Параметр	Позн.	Од. вим.	Вел.	Покликання
Обігрівна сторона				
Конвективний складник коефіцієнта теплообміну	α_c	Вт/(м ² °С)	25	EN 1991-1-2 Eurocode 1
Ступінь чорноти	ε		0,7	EN 1992-1-2 Eurocode 4
Необігрівна сторона				
Коефіцієнт теплообміну	α	Вт/(м ² °С)	9	EN 1991-1-2 Eurocode 1

Для теплотехнічних розрахунків сталобетонної плити взято теплофізичні властивості бетону відповідно до другої частини Eurocode 2 [103]. Таблиці та криві зміни теплофізичних характеристик металу, а також умови розрахунку докладно описано в розділі 2.2.

Параметри граничних умов представлено в табл. 6.5. Величини параметрів вибрані, з огляду на рекомендації других частин Eurocode 1 [35] та Eurocode 2 [103].

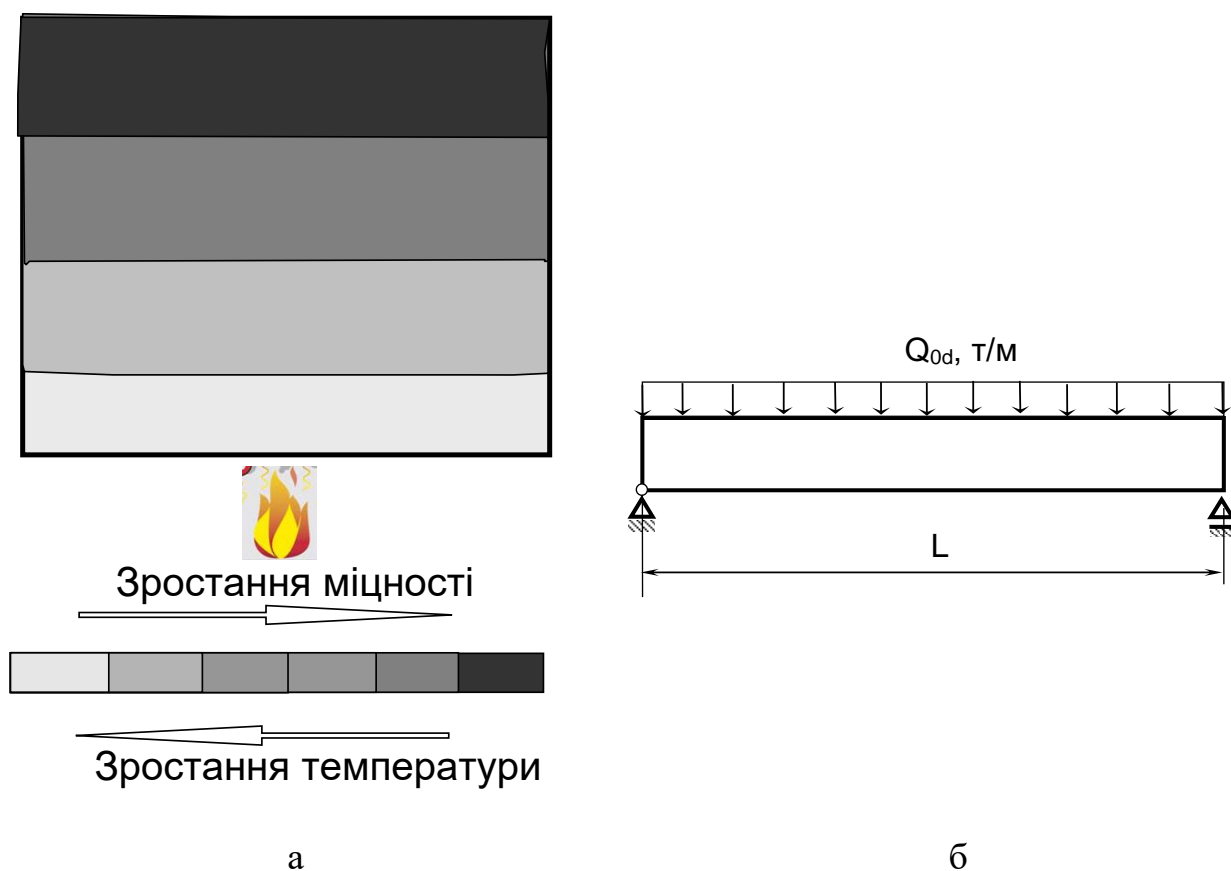


Рисунок 6.20 – Зміна міцності в перерізі плити залежно від температури (а) та розрахункова схема балки (б)

Аналіз рис. 6.20 і навантаження на конструкцію доводить, що плита є частковим випадком нагрівання балки. Різниця полягає в тому, що ширина балки нескінченна, тому необхідно враховувати лише односторонній обігрів. Розрахунок міцності плити під час нагрівання аналогічний до розрахунку балки,

проте спрощується до обігріву з однієї сторони. Крім того, у ході розрахунку плит на вогнестійкість необхідно зважати на втрату цілісності та теплоізолювальної спроможності. Це беруть до уваги як на етапі експериментальних досліджень, так і під час розрахунків. Необігрівна поверхня плити не прогрілася до температури, що перевищує $140\text{ }^{\circ}\text{C}$, це засвідчує можливу втрату міцності лише за показником несучої здатності [301–304].

Для оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних плит за результатами нагрівання в спеціальній малогабаритній вогневій печі необхідні такі дані: показники термопар у кожную хвилину випробувань, згідно зі схемою на рис. 6.20; клас міцності бетону та арматури; тип крупного заповнювача бетону; діаметри арматури, а також кількість і розташування стержнів, що зображено на рис. 6.21. Потім потрібно зафіксувати дані щодо геометричних розмірів перерізу балки та захисного шару бетону, розрахункову довжину балки й розрахункове розподілене навантаження.

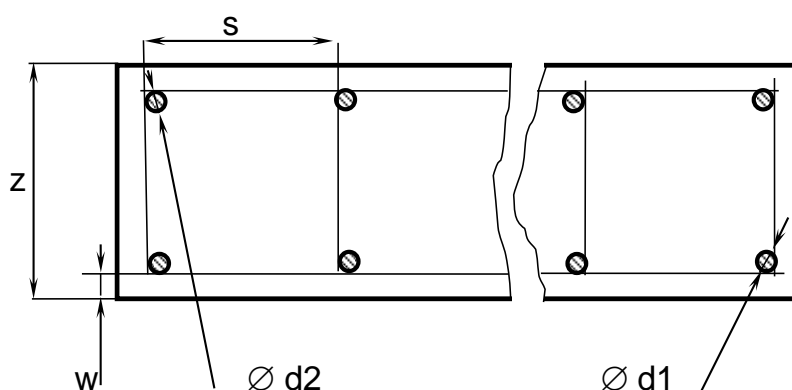


Рисунок 6.21 – Схема розташування та діаметри арматури плити

На рис. 6.22 представлено лістинг сторінки введення початкових даних, а на рис. 6.23 – лістинг сторінки результатів

Показание термометра		Вертикальное		Горизонтальное		Свойства бетона		Свойства арматуры со стороны обогреваемой поверхности		Свойства арматуры со стороны необогреваемой поверхности		Геометрические размеры		Расчетная схема				
Обогреваемая поверхность	Середина	Необогреваемая поверхность	Арматура (рабочая)	перемещение	перемещение	Класс прочности	Тип	Класс прочности	Диаметр d, м	Класс прочности	Диаметр d, м	Сечение	Толщина, м	Толщина защитного слоя w, м	Высота стены h, м	Шаг арматуры	Давление на плиту, q, т/м ²	350
T0, °C	T2, °C	T2, °C	Tst, °C	w, м	u, м													
1	38,982	20	20	20,84	-0,000316552	0,000058597	C 30/35	1 A500C	0,008	A240C	0,008	0,2	0,03	3,2	0,2			
2	84,969	20	20	26,427	-0,000286706	0,000390975												
3	152,076	20,002	20	36,04	-0,000200965	0,000685714												
4	168,402	20,007	20	45,065	-0,000193837	0,00137629												
5	195,738	20,021	20	53,473	-0,000138932	0,00193357												
6	228,524	20,049	20	63,545	-6,91679E-05	0,00263479												
7	259,458	20,101	20	75,316	1,14307E-05	0,00344035												
8	320,624	20,178	20	92,668	0,000104464	0,00435729												
9	369,969	20,292	20	110,605	0,00034131	0,00611666												
10	413,851	20,451	20	128,763	0,000660629	0,00846256												
11	452,656	20,663	20	143,729	0,000996347	0,0103331												
12	486,325	20,936	20	155,473	0,00130112	0,0119607												
13	515,717	21,273	20,001	167,295	0,00180363	0,0148719												
14	541,622	21,676	20,002	179,185	0,00202155	0,0162171												
15	564,806	22,144	20,003	191,298	0,00224315	0,0175106												
16	585,419	22,679	20,004	203,675	0,00259936	0,0184045												
17	604,294	23,28	20,007	215,983	0,00260545	0,0198267												
18	621,706	23,951	20,099	228,526	0,00281636	0,0212759												
19	637,906	24,691	20,016	241,212	0,00302495	0,0227241												
20	652,794	25,501	20,02	254,035	0,00309556	0,0239373												
21	666,818	26,385	20,028	267,003	0,00338241	0,0252371												
22	679,812	27,344	20,038	280,011	0,00354782	0,0264444												
23	692,206	28,37	20,051	292,201	0,00372446	0,0277242												
24	703,59	29,45	20,067	303,675	0,00389665	0,0289873												
25	714,296	30,571	20,086	314,202	0,00405949	0,0301804												
26	724,292	31,728	20,109	324,183	0,00421601	0,0313455												
27	733,683	32,919	20,137	333,672	0,00436185	0,032467												
28	742,478	34,14	20,169	342,659	0,00449846	0,0334746												
29	750,811	35,394	20,208	351,078	0,00462546	0,0345152												
30	758,676	36,679	20,252	359,225	0,00472568	0,0353011												
31	766,184	37,997	20,303	367,039	0,00485123	0,0363039												
32	773,313	39,35	20,361	374,557	0,004959376	0,0374296												
33	780,006	40,74	20,427	381,834	0,00510186	0,0382825												
34	786,486	42,166	20,5	388,879	0,00523591	0,0392921												
35	792,712	43,629	20,583	395,722	0,00534835	0,0402042												
36	798,74	45,13	20,674	402,38	0,00544022	0,0409671												
37	804,538	46,669	20,774	408,874	0,00554278	0,0417921												
38	810,164	48,245	20,885	415,217	0,00565509	0,042657												
39	815,636	49,796	21,005	421,42	0,00578036	0,0434536												
40	820,98	51,293	21,136	427,487	0,00592733	0,0442509												
41	826,943	52,757	21,278	433,426	0,0059381	0,0448291												
42	830,871	54,202	21,431	439,239	0,00603565	0,0456361												
43	835,639	55,64	21,596	444,933	0,00613394	0,0465146												
44	840,29	57,078	21,772	450,51	0,00621996	0,0472584												
45	844,798	58,524	21,96	455,977	0,00629166	0,047967												
46	849,202	59,981	22,16	461,335	0,00636483	0,0486644												
47	853,476	61,452	22,372	466,583	0,00642131	0,0492159												

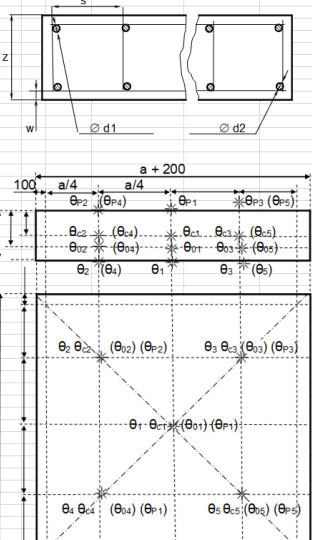


Рисунок 6.22 – Сторінка введення початкових даних

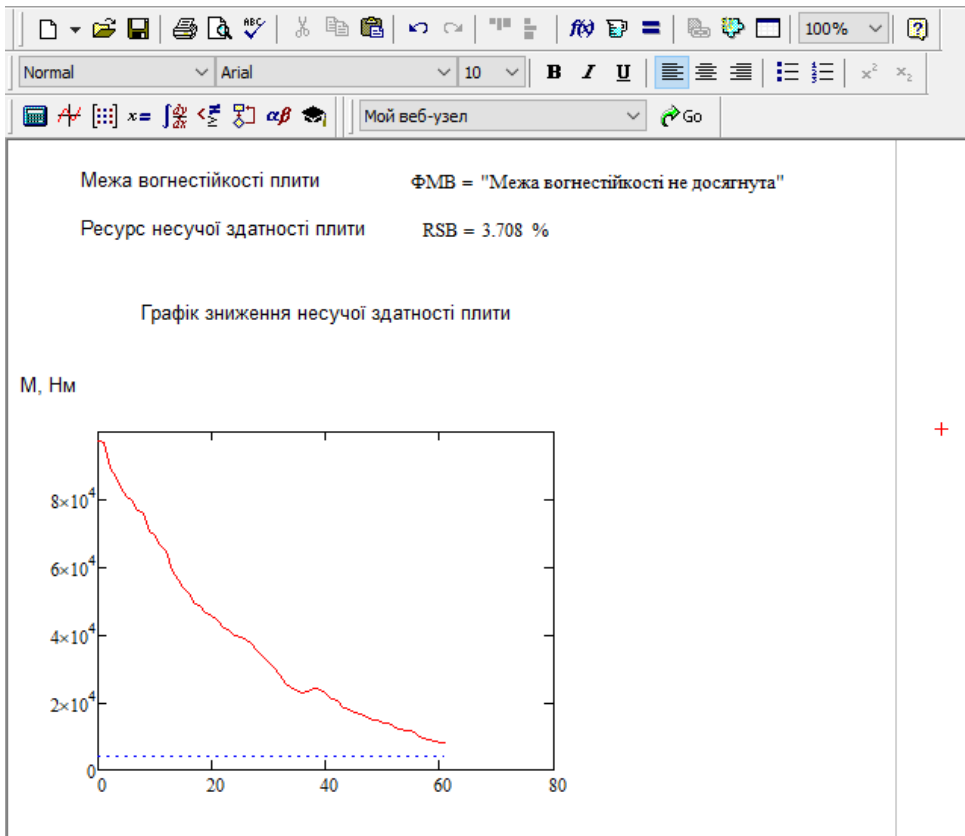


Рисунок 6.23 – Сторінка виведення результатів

Згідно з рисунками 6.22 і 6.23, під час уведення початкових даних зниження міцності плит відображається в графічному та чисельному вигляді. У разі зміни вхідних даних зміняться й результати розрахунків.

6.2.3. Результати використання запропонованого методу. Доцільно проаналізувати конкретний приклад залізобетонної плити. На рис. 6.23 представлено вигляд перерізу балки та схему його армування із зазначенням параметрів робочої арматури, відповідно до запропонованих у методиці (рис. 6.24).

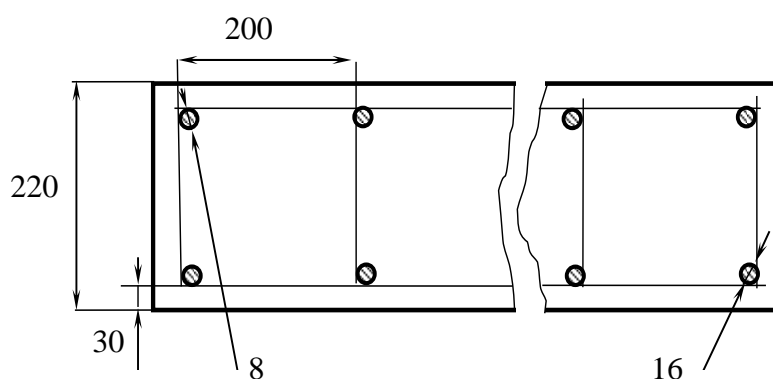


Рисунок 6.24 – Параметри армування плити в перерізі

Таблиця 6.6

Основні параметри залізобетонної стіни

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Геометричні розміри			
– довжина	b	6	м
– товщина захисного шару	w	0,03	
– товщина	z	0,22	
Тип бетону	Важкий	Клас С 30/35 (В30)	
Густина бетону	ρ_B	2230	кг/м ³
Робоча арматура:		Клас А240С	м
– діаметр більший	d_1	0,016	
– діаметр менший	d_2	0,008	
– крок	s	0,2	

Після інтерполяції отримано розподіл температур, що зображено на рис. 6.25.

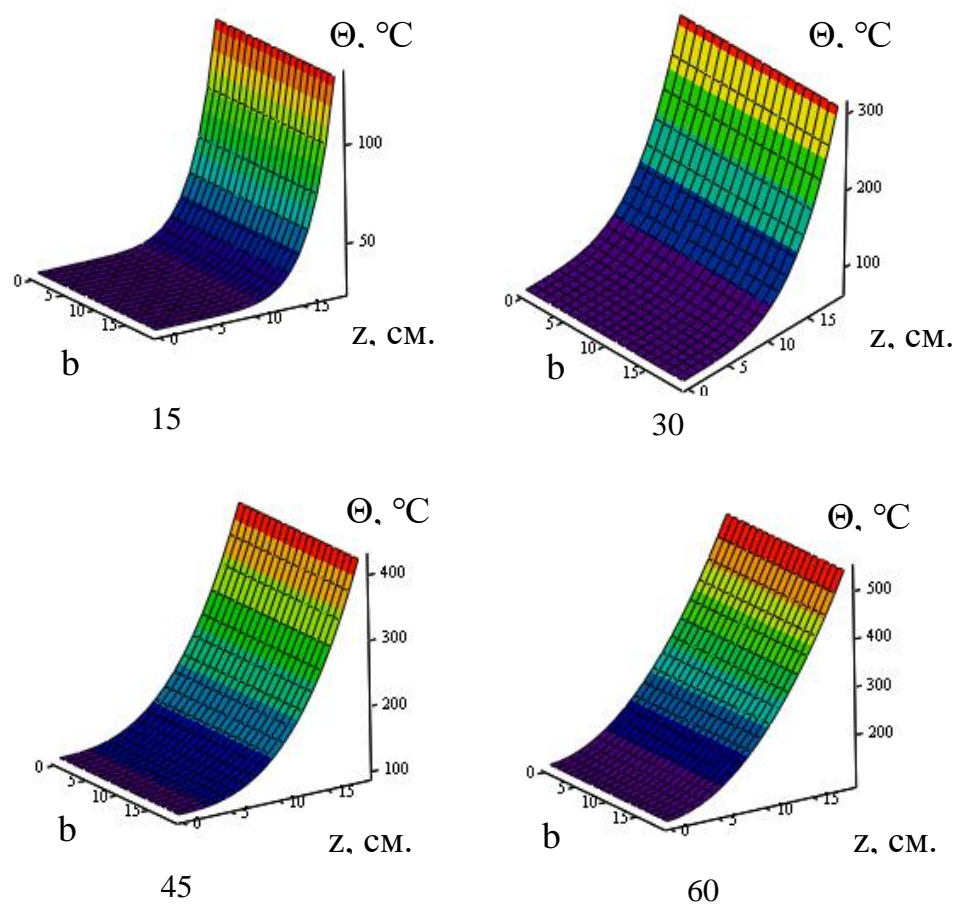


Рисунок 6.25 – Результати інтерполяції температур за значеннями температур у контрольних точках перерізу

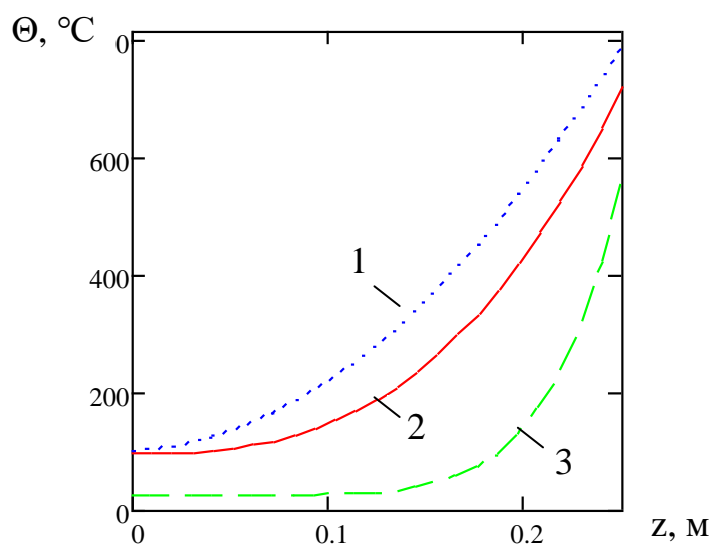


Рисунок 6.26 – Узагальнені результати інтерполяції температур за значеннями температур у контрольних точках перерізу

Унаслідок розрахунку, визначено, що межа вогнестійкості за 60 хв. не настає, а ресурс несучої здатності становить 3 %. На рис. 6.27 продемонстровано графік зниження несучої спроможності плити із запропонованими характеристиками.

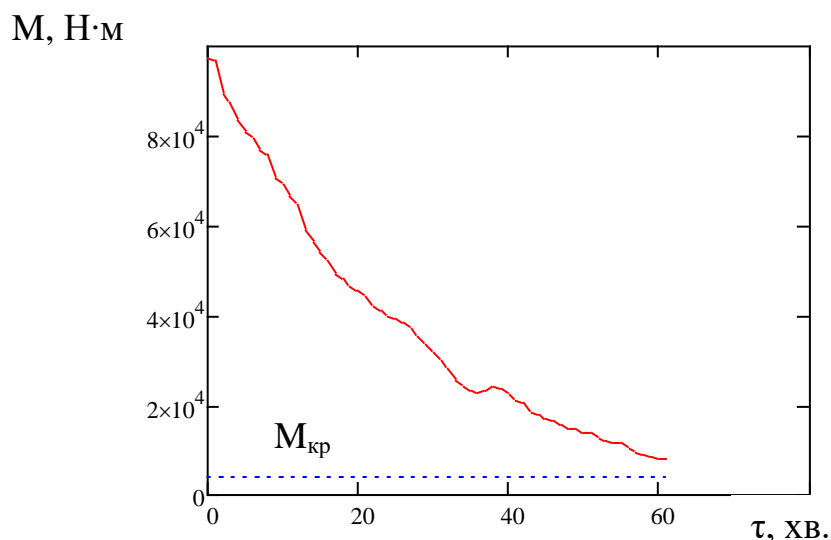


Рисунок 6.27 – Графік зниження несучої спроможності плити з розподіленим навантаженням $3,5 \text{ т/м}^2$, відповідно до результатів експериментального визначення температури в контрольних точках елемента конструкції

На рис. 6.27 викладено отримані результати. Дані плити відповідали характеристикам досліджуваного зразка та температурам прогрівання її слоїв під час експерименту. Додатково введено відомості щодо довжини плити й розподіленого навантаження, що запроєктоване в ході роботи конструкції в будівлі. Їх зміна вможливить визначення межі вогнестійкості для стін інших габаритів та з іншим робочим навантаженням. На рис. 6.28 продемонстровано зниження міцності плити довжиною 6 м із розподіленим навантаженням 350 т/м^2 .

Оскільки межі вогнестійкості не досягнуто, виконано інтерполяцію температур прогрівання плити в ключових точках. В оригінальному методі час випробування можливо збільшити, але для порівняння з даними інших

досліджень виконано ці розрахунки. Розраховано межу вогнестійкості плити аналогічних параметрів (рис. 6.27).

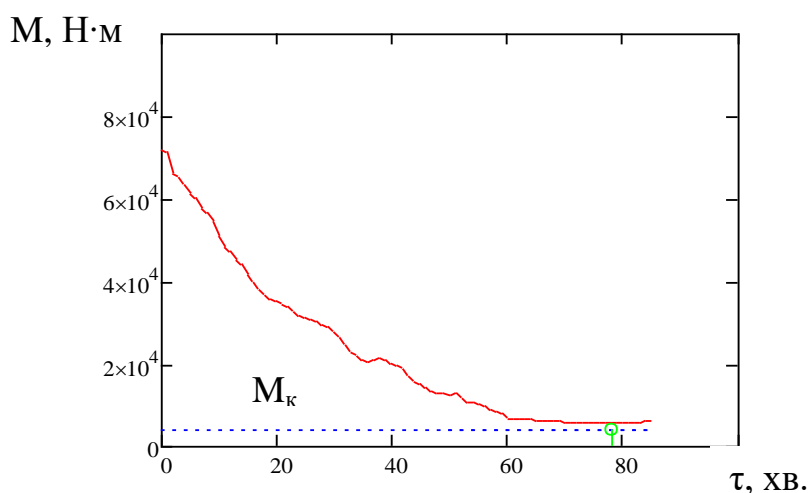


Рисунок 6.28 – Графік зниження несучої спроможності плити з розподіленим навантаженням $3,5 \text{ т/м}^2$ до моменту настання граничного стану втрати несучої здатності

Відповідно до отриманих результатів (рис. 6.28), межа вогнестійкості плити із заданими характеристиками настає на 78 хвилині.

6.2.4. Порівняльний аналіз оцінювання межі вогнестійкості плити.

Порівняно результати, одержані за запропонованим методом, з експериментальними даними, що описані в науковій літературі. Отримано величини відхилень результатів запропонованого методу та випробувань на вогнестійкість схожих конструкцій у вогневих печах.

Додатково виконано розрахунок межі вогнестійкості плити аналогічного перерізу довжиною 6 м із розподіленим навантаженням 350 т/м^2 . Для врахування більшого часу прогрівання проведено інтерполяцію результатів теплового впливу на стіну та розрахунок за описаною вище методикою. Результати розрахунку представлено на рис. 6.28.

Згідно з рисунком 6.28, межі вогнестійкості плити досліджуваної товщини та параметрів армування, довжиною 6 м досягнуто на 78 хвилині. Адекватність запропонованого методу вивчено внаслідок порівняння експериментальних даних, описаних у науковій літературі, із результатами розрахунку. Одержано величини можливих похибок.

Проаналізовано залізобетонну стіна $220 \times 3200 \times 6000$ із важкого бетону на гранітному заповнювачі. Робоча арматура А500С, поперечна арматура А240С (рис. 6.29). Геометричні параметри взято з [136].

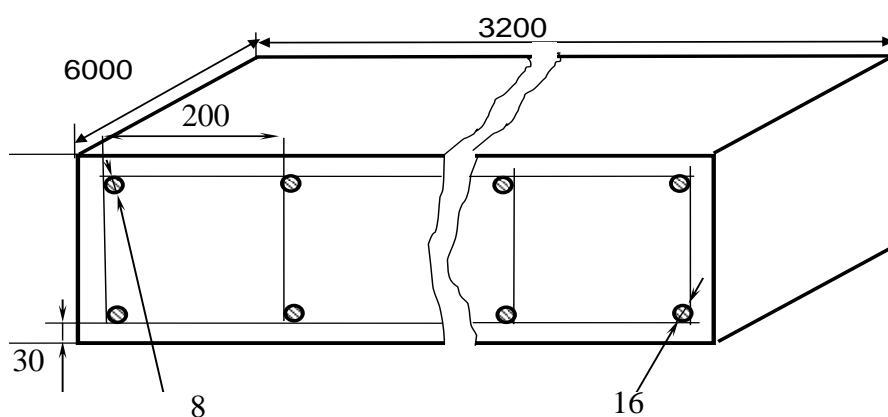


Рисунок 6.29 – Розрахункова схема залізобетонної плити, що використана під час експериментальних досліджень

У [136] представлено дані випробувань залізобетонних плит для різних класів міцності бетону, різних діаметрів арматури та різних товщин захисного шару за збереження подовжньої сили, що діє, і геометричних розмірів плит.

На підставі даних виконано розрахунок за розробленим алгоритмом із використанням експериментальних даних із монографії [136] про температури й параметри випробовуваних колон. Порівняльні дані результатів розрахунку та експерименту систематизовано в табл. 2.

Дані аналізу адекватності результатів розрахунку за розробленим методом

Захисний шар бетону, мм	Характеристики бетону		Характеристики арматури		Розподілене навантаження, т/м ²	Відхилення температури середини плити, %	Межа вогнестійкості, отриманий експериментально, хв.	Розрахункова межа вогнестійкості, хв.	Відносне відхилення, %
	Тип	Клас міцності	Клас міцності	Діаметр, мм					
30	0	C30/35	A5400	16	350	8	не менше 60 хвилин	67	11

Дані, отримані під час експериментальної роботи, та дані експериментально-розрахункового методу відрізняються на 11 %. Під час експериментальних досліджень не досягнуто межі вогнестійкості. Розрахункові дані підтверджують експериментальні.

6.3. Методики оброблення експериментальних даних для оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних колон

6.3.1. Адекватність розрахунку температурного поля у фрагментах колон за результатами експериментальних досліджень. У розділі 2.2 проаналізовано й запропоновано методи апроксимації температурних розподілів на основі точкових замірів температури, що отримані під час нагрівання залізобетонних колон за стандартним температурним режимом пожежі. Один із методів заснований на використанні покрокового спуску, залучено також метод кінцевих різниць. Щоб побудувати криві розподілу температур, необхідно отримати дані контролю температури в точках, що зображено на рис. 5.23. Можна

використати моделі теплопередачі (2.1) – (2.7) із граничних умов III роду на граничні умови I роду, оскільки за експериментальними даними відомі температури на поверхні залізобетонної колони [305].

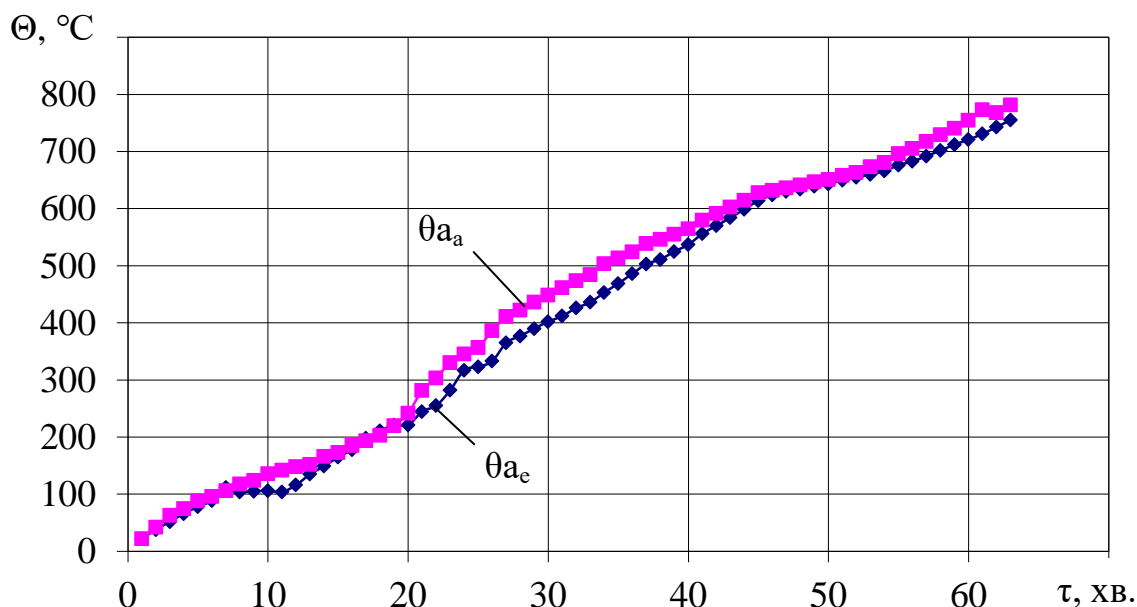


Рисунок 6.30 – Прогрів фрагмента залізобетонної колони на рівні арматури: θ_{a_a} – дані апроксимації; θ_{a_e} – середня температура відповідно до показників термопар під час експериментальних досліджень (рис. 5.23)

Згідно з описаними підходами, для розв'язування задачі теплопровідності потрібно добирати просторовий і часовий кроки окремо. Вибір кроків ускладнений, порівняно зі стінами й колонами (розділ 6.1 та 6.2), оскільки колони мають зазначати чотиристороннього нагрівання. Проте технічно завдання спрощене, тому що можливо використовувати симетричну четвертину колони.

У табл. 6.8 представлено результати розрахунків відносного відхилення та критеріїв адекватності, відповідно до даних експериментів і розрахунків.

З Місце замірів температури на рівні арматури (рис. 5.23) у середній частині фрагмента залізобетонної колони не застосовано для розрахунку, але експериментальні дані отримані. Для перевірки адекватності порівняно зміну

температури, що отримано за результатами нагрівання в малогабаритній вогневій печі та внаслідок інтерполяції результатів розрахунку температурних полів.

Таблиця 6.8

Параметри дисперсії

Зона термопар (рис. 6.5)	Максимальне відхилення, °C	Середнє відхилення, °C	Відносне відхилення, %	F-критерій	Критичне значення F-крит. [181]	t-критерій	Критичне значення t-крит. [181]	Q-критерій	Критичне значення Q-крит.
$\theta_{a_c}; \theta_{a_a}$	47	18	4,5	1,4	4,49	1,2	2,92	0,21	0,45

Відповідно до алгоритму, представленого в розділі 2.2, проведено розрахунки й побудовано графіки прогрівання в точках розміщення термопар, згідно зі схемою на рис. 5.23, на основі замірів температури на обігрівній стороні та всередині колони. Потім зіставлено результати з експериментальними даними. На рис. 6.30 продемонстровано порівняння графіків розрахункових та експериментальних даних на рівні арматури [305].

Аналіз графіків на рис. 6.30 засвідчує, що дані, отримані внаслідок застосування запропонованого методу інтерполяції, є достатньо точними, оскільки перебувають у межах експериментальної похибки. Щоб оцінити, наскільки якісно математична модель відтворює результати експериментів, необхідно отримати кількісні показники її адекватності. За допомогою виразів 5.1 – 5.6 визначено критерії Фішера, Стюдента та Кохрена [305].

Згідно з таблицею 6.8, розраховані критерії адекватності (t-критерій Стюдента, Q-критерій Кохрена, F-критерій Фішера) не перевищують критичних значень.

Перевірка адекватності апроксимації результатів спонукає до висновку про те, що температурні поля можливо використовувати для подальшого розрахунку

зміни міцнісних характеристик залізобетонної колони під час нагрівання за стандартним температурним режимом пожежі.

6.3.2. Оцінювання межі вогнестійкості залізобетонної колони за результатами вогневих випробувань без механічного навантаження. У ході експерименту під час нагрівання залізобетонної колони за стандартною температурною кривою пожежі в малогабаритній вогневій печі без механічного навантаження отримано результати її прогріву в контрольних точках. Наступний етап – оцінювання розрахунковим способом вогнестійкості елемента конструкції за несучою здатністю.

Метод дає змогу врахувати зміну механічних властивостей кожного шару бетону та арматурної сталі, залежно від їхньої температури нагрівання. Принцип зміни механічних властивостей бетону та арматурної сталі продемонстровано на рис. 6.30-а. Цю зміну беруть до уваги в ході аналізу параметрів напружено-деформованого стану в перерізі колони, відповідно до схеми закріплення в конструкції (рис. 6.30-б), геометричних параметрів, класу міцності бетону та арматурної сталі. Рівняння, що описують напружено-деформований стан, вибрані відповідно до рекомендацій EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2 [103].

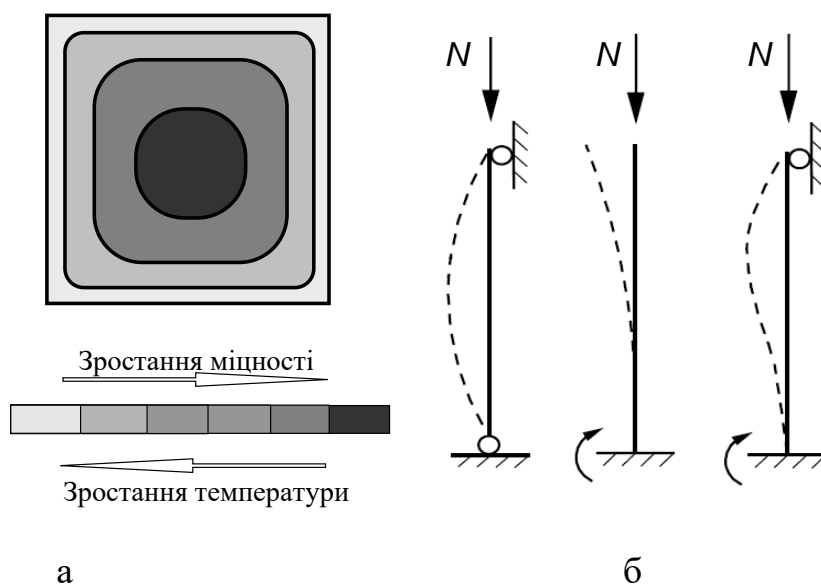


Рисунок 6.31 – Схема зміни міцності в перерізі колони (а) та розрахункові схеми закріплення колон у конструкціях (б)

Дані експериментальних досліджень представлено в розділі 5.3.

Вибір коефіцієнта закріплення колони (μ) репрезентовано на рис. 6.32.

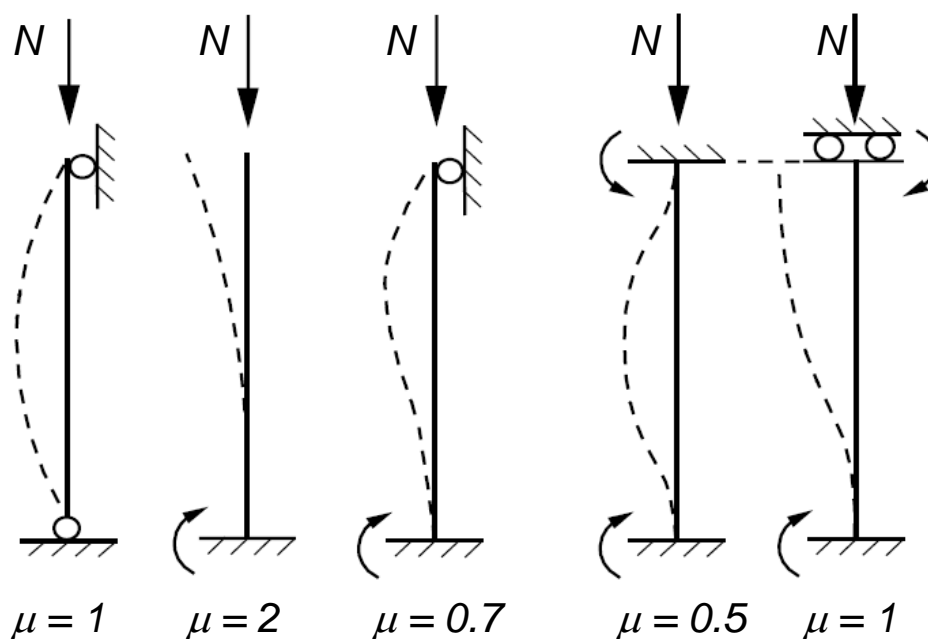


Рисунок 6.32 – Визначення коефіцієнта закріплення колони

Для оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних колон за результатами вогневих випробувань необхідні показники термопар у кожену хвилину випробувань згідно зі схемою, що зображена на рис. 5.23. Результати вогневих випробувань систематизовано на рис. 5.26.

Клас міцності бетону й арматури, тип крупного заповнювача, бетону, діаметр арматури та схему армування представлено в розділі 5.3. До розрахунку залучено всі дані, відповідно до реальних зразків, що нагрівалися в малогабаритній вогневій печі.

Несуча здатність прирівняна до значення критичної сили, що визначають для кожного моменту часу випробування. Критичну силу визначають залежно від розрахованої поздовжньої сили, від кривизни колони (див. рис. 6.31).

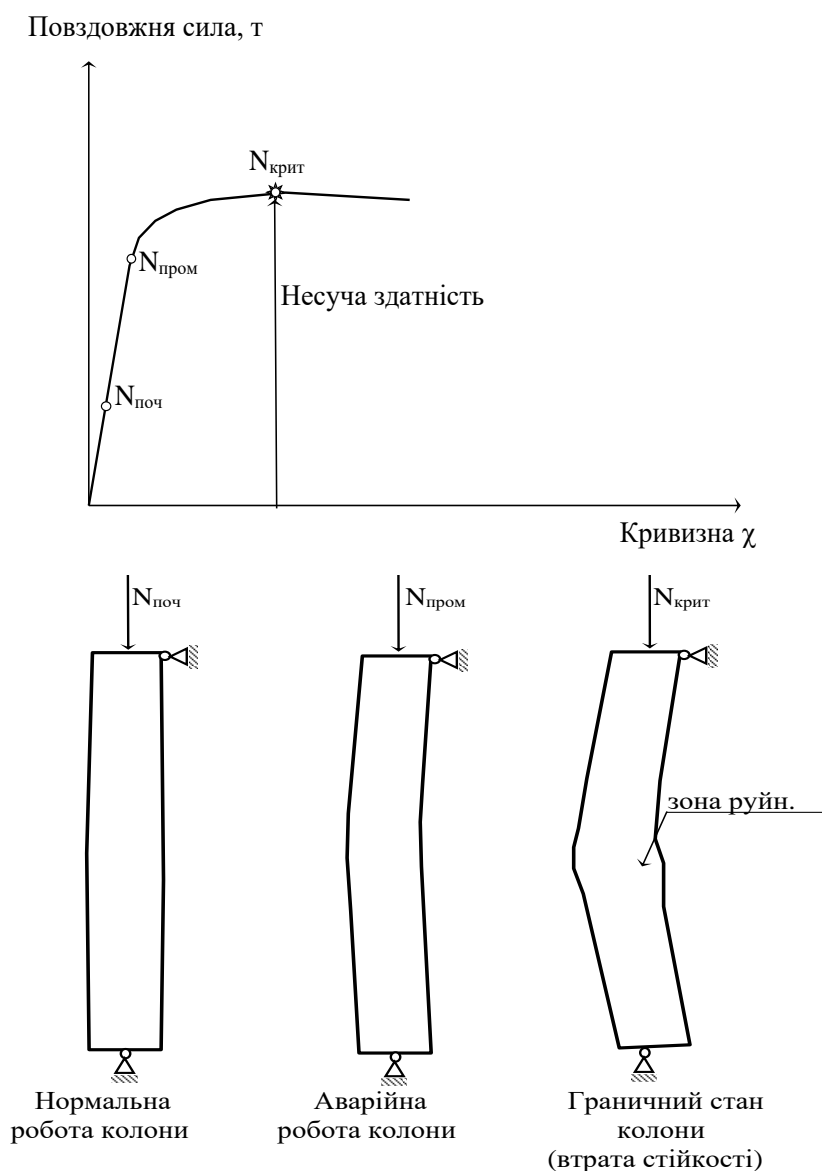


Рисунок 6.33 – Визначення несучої здатності колони протягом часу оцінювання вогнестійкості

Критичну силу визначають у момент настання стану, коли кривизна зростає, а сила не зростає (граничний стан втрати стійкості колони). Щоразу отримане значення критичної сили в певний час випробування порівнюють із розрахунковою силою, що діє. Втрата несучої здатності відбувається в момент, коли критична сила дорівнює розрахунковій силі або більша за неї.

Алгоритм розрахунку передбачає низку процедур, що описані нижче.

1. Уведення початкових даних, визначення початкових коефіцієнтів. До початкових даних також входять реальні розміри елемента та запроєктоване навантаження на колону. Крім того, фіксують аналогічні до експериментальних

досліджень характеристики матеріалу й арматури, а також схему армування. Для цього створено сторінку початкових даних у «Microsoft Excel», що продемонстровано на рис. 6.39.

2. Початкові дані імпортують до середовища програмного комплексу «Mathcad» і проводять інтерполяцію коефіцієнтів для побудови діаграм деформування кожного шару бетону в перерізі колони й арматурної сталі.

3. На основі розв'язання рівнянь рівноваги визначають крайні деформації в перерізі, а також критичну силу.

4. Розрахунок повторюють для наступного часу.

5. За умови втрати несучої здатності (рис. 6.40) розрахунок припиняють або проводять до кінця часу випробування.

6. За умови настання межі вогнестійкості обчислюють його значення.

7. У разі відсутності граничного стану обчислюють залишковий ресурс несучої здатності колони.

Відповідно до рекомендацій, описаних у праці [180], спочатку обчислюють температурні розподіли з побудовою ліній ізотерм. Потім переріз розбивають на зони з приблизно однаковою температурою за побудованими лініями ізотерм, як зображено на рис. 6.42.

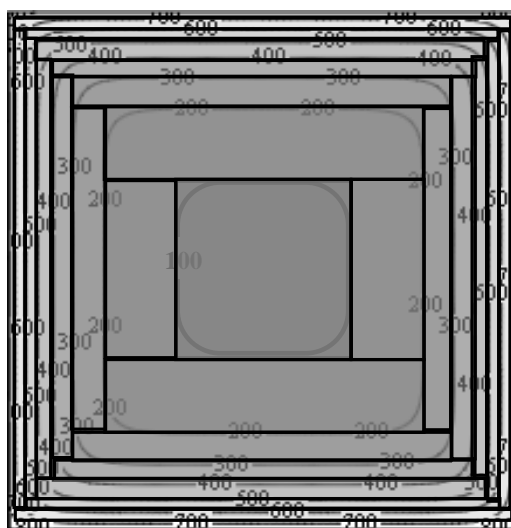


Рисунок 6.34 – Схема розбиття перерізу залізобетонної колони на зони з однаковою температурою

Для подальшого розрахунку визначають площу A_{sij} і координати x_{ij}, y_{ij} центру кожної зони. На підставі використання діаграм деформування бетону й арматурної сталі для кожної хвилини випробування будують графіки залежності моменту в поперечному перерізі та залежності моменту поздовжньої сили від радіуса кривизни нейтральної лінії колони, що проілюстровано на рис. 6.8. Графік побудований під час розв'язання системи рівнянь (6.16).

$$\begin{cases} \sum_i \sigma_{bi} A_{bi} Y_{bi} + \sum_j \sigma_{sj} A_{sj} Y_{sj} = M_T \\ \sum_i \sigma_{bi} A_{bi} + \sum_j \sigma_{sj} A_{sj} = N_T \end{cases} \quad (6.15),$$

де M_T, N_T – зовнішні головні моменти та поздовжня сила;

$A_{bi}, Y_{bi}, \sigma_{bi}$ – площа, координати центру тяжіння i -ї ділянки бетону й напруження на рівні центру тяжіння;

$A_{sj}, Y_{sj}, \sigma_{sj}$ – площа, координати центру тяжіння i -го стержня арматури й напруження в ньому.

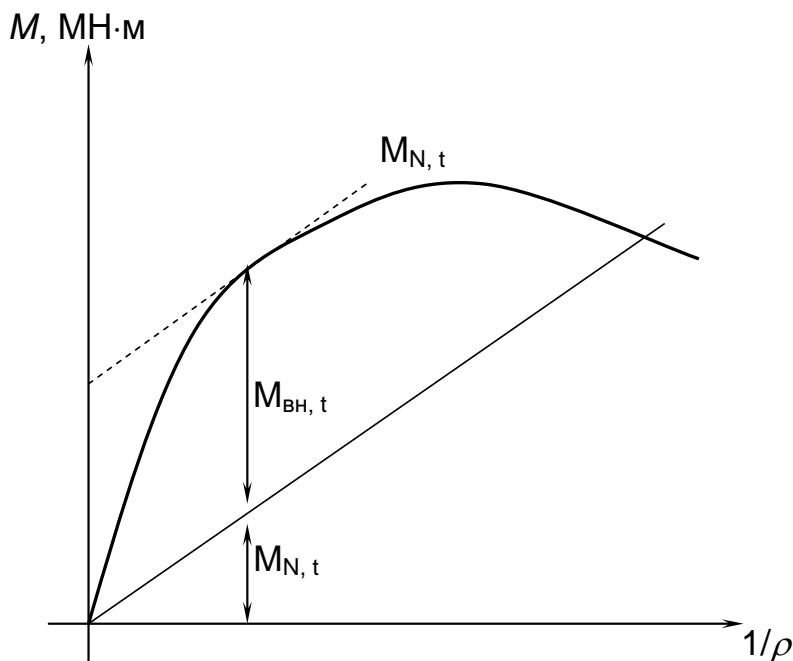


Рисунок 6.35 – Схема визначення моментів під час розрахунку колони

Напруження в ділянках бетону й арматурної сталі визначають із використанням вибраної моделі як функції граничних деформацій і кривизни колони за виразами:

$$\sigma_{bi} = f_1(\varepsilon_{bi}), \sigma_{sj} = f_2(\varepsilon_{sj}), \varepsilon_{bi} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r}Y_{bi}, \varepsilon_{sj} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r}Y_{sj} \quad (6.16),$$

де ε_0 – відносна деформація крайової точки перерізу в напрямку найменшого моменту інерції;

$1/r$ – кривизна колони.

У кожен контрольний момент часу перевірено умову:

$$M_{bh, T} > N \cdot e_0 \quad (6.17),$$

де e_0 – ексцентриситет прикладеного навантаження, відповідно до розрахункової схеми.

Якщо умова не виконана, це означає, що настає межа вогнестійкості.

Момент від зовнішнього навантаження побудований із використанням формули:

$$M_{N, T} = N \cdot (1/\rho) \cdot l_0 \cdot c^{-1} \quad (6.18),$$

де $l_0 = \mu \cdot l$ – приведена довжина колони (μ - коефіцієнт закріплення, l – довжина колони);

$c = 10$ – числовий параметр, що характеризує жорсткість системи.

Для опису термомеханічних властивостей бетону та арматурної сталі застосовано стандартні діаграми, що подано на рис. 6.35.

На рис. 6.36 представлено блок-схему для побудови графіка моменту, залежно від кривизни нейтральної лінії колони. Для зручності визначення межі вогнестійкості випробовуваних колон графік на рис. 6.35 перетворюється на графік несучої здатності за формулою:

$$N_{\text{lim}, t} = M_{\text{вн}, t} / e_n \quad (6.19),$$

де $e_n = \mu^2 l^2 / \pi^2$ – ексцентриситет поздовжньої сили.

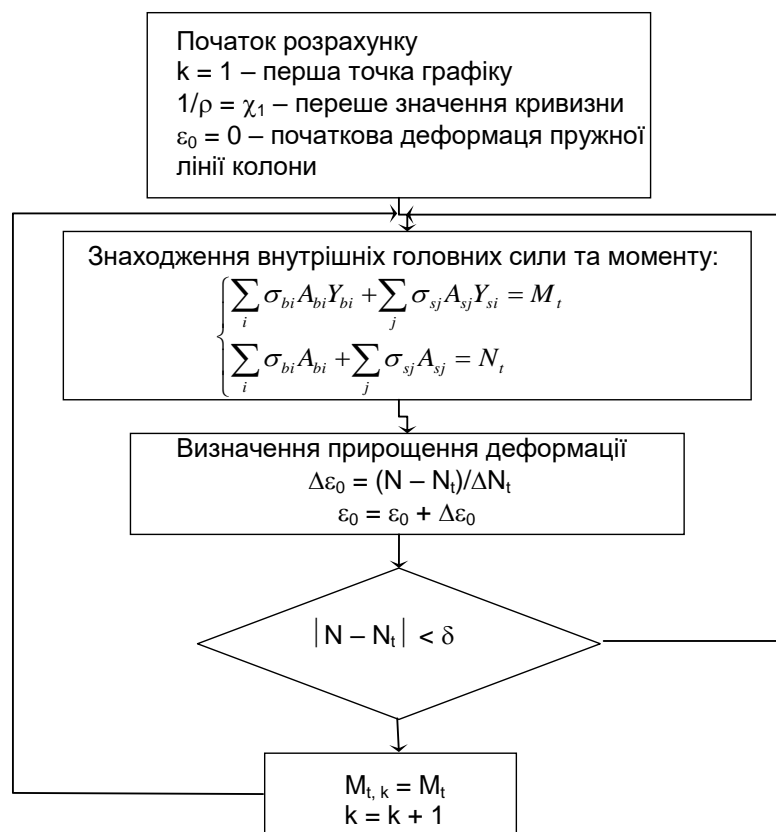


Рисунок 6.36 – Блок-схема побудови графіка головного моменту в переріз
КОЛОНИ

Для оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних балок за результатами нагрівання в спеціальній малогабаритній вогневій печі необхідні такі дані: показники термометрів у кожен момент часу випробувань, згідно зі схемою на рис. 6.37.

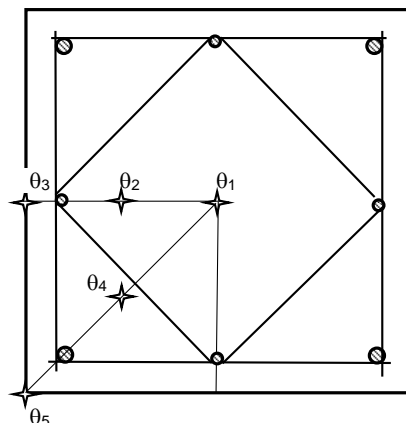


Рисунок 6.37 – Схема розташування термометрів та розбиття перерізу колони на зони

Клас міцності бетону й арматури; тип крупного заповнювача бетону; діаметри арматури, а також кількість і розташування стержнів, що представлено на рис. 6.38.

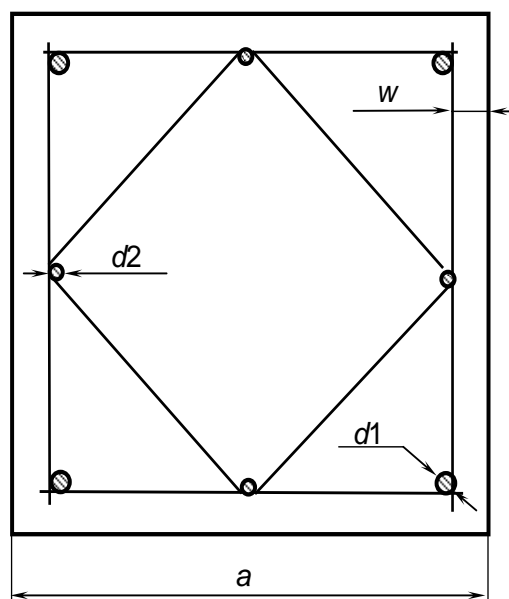


Рисунок 6.38 – Схема армування залізобетонної колони

Вырезать
Вставить

Буфер обмена

Шрифт

Выравнивание

Объединить и поместить в центре

Переносить текст

Общий

Форматирование

Стили

А	В	С	Д	Е	Г	Ж	З	И	К	Л	М	Н	О	Р	Q
Показание термометра		Диаметр		Т1, °C	Т2, °C	Т3, °C	Т4, °C	Т5, °C	Свойства бетона		Свойства рабочей арматуры		Свойства дополнительной арматуры		Расчетная схема
Свойства бетона		Свойства рабочей арматуры		Свойства дополнительной арматуры		Свойства дополнительной арматуры		Свойства дополнительной арматуры		Свойства дополнительной арматуры		Свойства дополнительной арматуры		Свойства дополнительной арматуры	
Класс прочности		Класс прочности		Класс прочности		Класс прочности		Класс прочности		Класс прочности		Класс прочности		Класс прочности	
C20/25		C20/25		C20/25		C20/25		C20/25		C20/25		C20/25		C20/25	
Тип		Тип		Тип		Тип		Тип		Тип		Тип		Тип	
1 А400С		1 А400С		1 А400С		1 А400С		1 А400С		1 А400С		1 А400С		1 А400С	
Диаметр d1, м		Диаметр d2, м		Диаметр d3, м		Диаметр d4, м		Диаметр d5, м		Диаметр d6, м		Диаметр d7, м		Диаметр d8, м	
0,016		0,016		0,016		0,016		0,016		0,016		0,016		0,016	
A240C		A240C		A240C		A240C		A240C		A240C		A240C		A240C	
Ширина а, м		Длина L, м		Толщина защитного слоя w, м		Ширина а, м		Длина L, м		Толщина защитного слоя w, м		Ширина а, м		Длина L, м	
0,2		2,4		0,008		0,2		2,4		0,008		0,2		2,4	
Кoeffициент заделки		Кoeffициент заделки		Кoeffициент заделки		Кoeffициент заделки		Кoeffициент заделки		Кoeffициент заделки		Кoeffициент заделки		Кoeffициент заделки	
0,5		0,5		0,5		0,5		0,5		0,5		0,5		0,5	

Рисунок 6.39 – Сторінка введення початкових даних

Фіксування даних щодо геометричних розмірів перерізу балки й захисного шару бетону, розрахункової довжини колони та повздовжньої сили, що діятиме, відповідно до даних проекту.

Розроблено спеціальну розрахункову програму засобами математичних програмних комплексів. На рис. 6.39 представлено лістинг сторінки введення початкових даних, а на рис. 6.40 – лістинг сторінки результатів.

Після розрахунків їхні результати перевірено на адекватність, відповідно до розробленого методу.

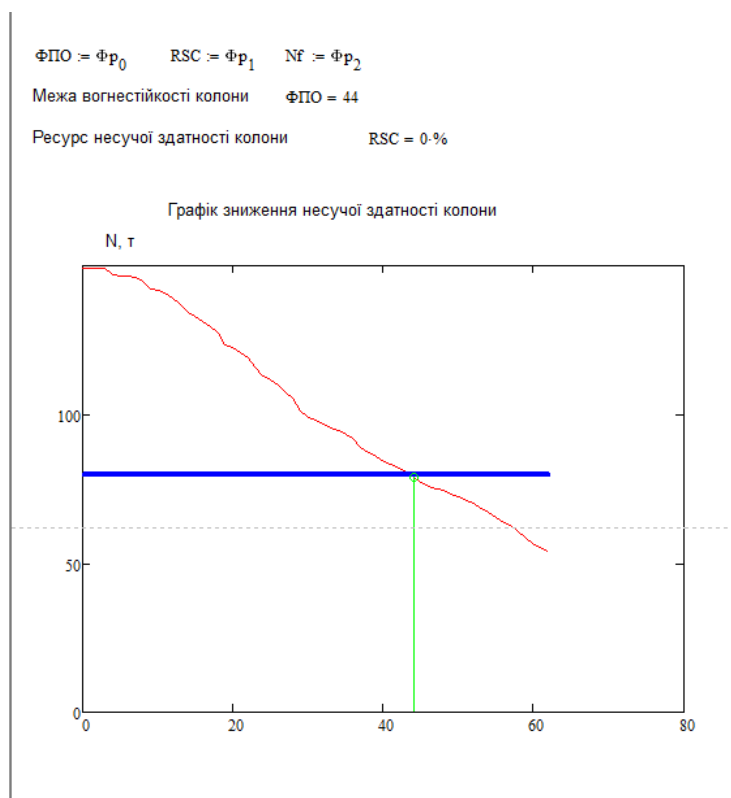


Рисунок 6.40 – Сторінка виведення результатів

На рис. 6.40 проілюстровано сторінку виведення результатів. Дані колони відповідали характеристикам зразка й температурам прогрівання його шарів під час експерименту (рис. 6.39). На підставі аналізу результатів формулюють висновок, за необхідності окреслюють рекомендації щодо підвищення вогнестійкості.

6.3.3. Результати використання запропонованого методу. Результати розрахунку представлені для залізобетонної колони з характеристиками, що відповідали виготовленим для вогневого експерименту зразкам. Додатково задано

висоту запроєктованої колони та навантаження, що вона сприйматиме в будівлі. На рис. 6.41 продемонстровано вигляд перерізу колони та схему армування, відповідно до запропонованих у методиці (рис. 5.15 і рис. 5.18).

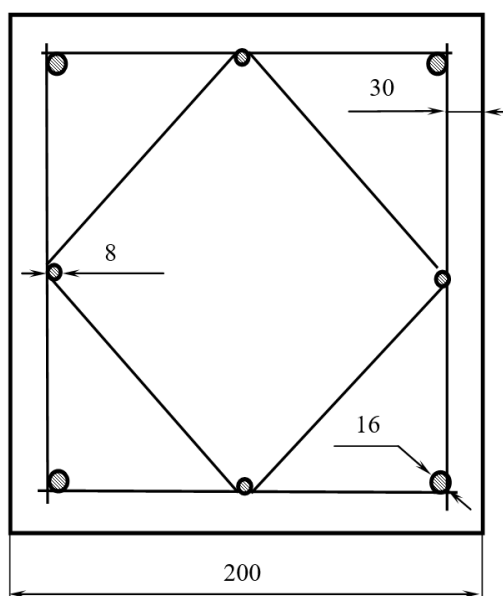


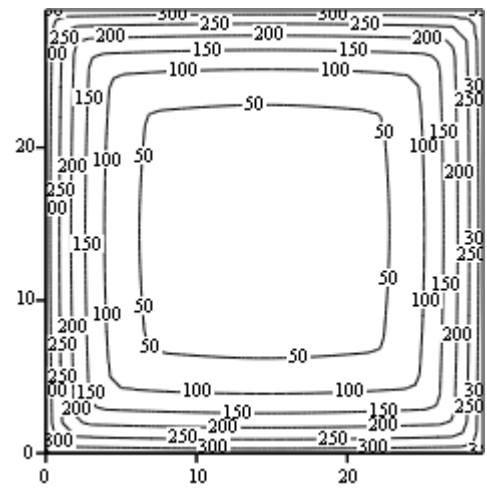
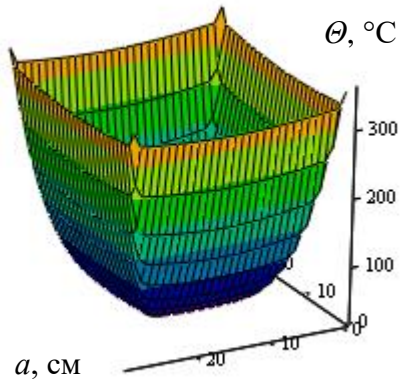
Рисунок 6.41 – Параметри перерізу колони, мм

Таблиця 6.9

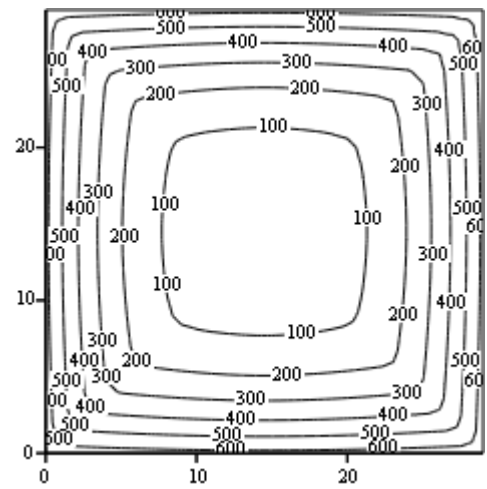
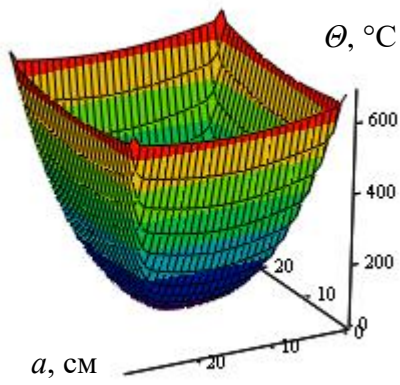
Основні параметри залізобетонної колони

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Геометричні розміри			
– ширина	a	0,2	м
– висота	b	2.4	
– ширина захисного шару	w	0,03	
– довжина балки	L	4,75	
Тип бетону	Важкий на гранітному заповнювачі	Клас С 20/25 (В30)	
Густина бетону	ρ_B	2230	кг/м ³
Робоча арматура:		Клас А400С	м
– діаметр більший	d_1	0,016	
– діаметр менший	d_2	0,008	
Додаткова арматура:		Клас А400С	м
– діаметр	d_3	0,008	

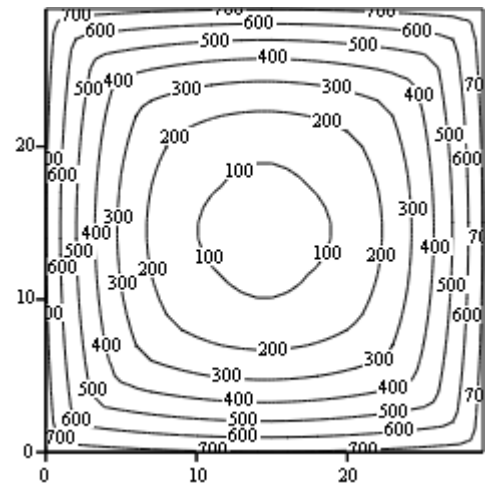
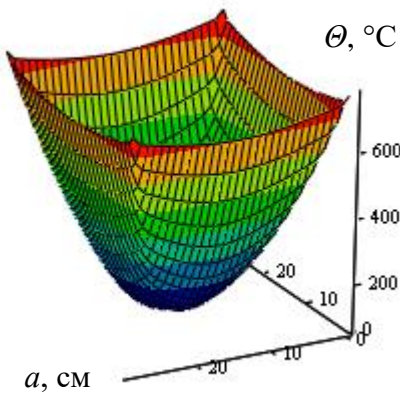
Після інтерполяції отримано розподіли температур, що зображено на рис. 6.42.



15 хвилина



30 хвилина



45 хвилина

Рисунок 6.42 – Результати інтерполяції температур за значеннями температур у контрольних точках перерізу

Для інтерполяції взято результати розрахунку теплової задачі для перерізу залізобетонної колони, згідно з рекомендаціями EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2 [103].

За отриманими значеннями максимальних моментів побудовано графік зниження несучої спроможності, що представлено на рис. 6.43.

Унаслідок розрахунку визначено межу вогнестійкості, що становить 59 хв.

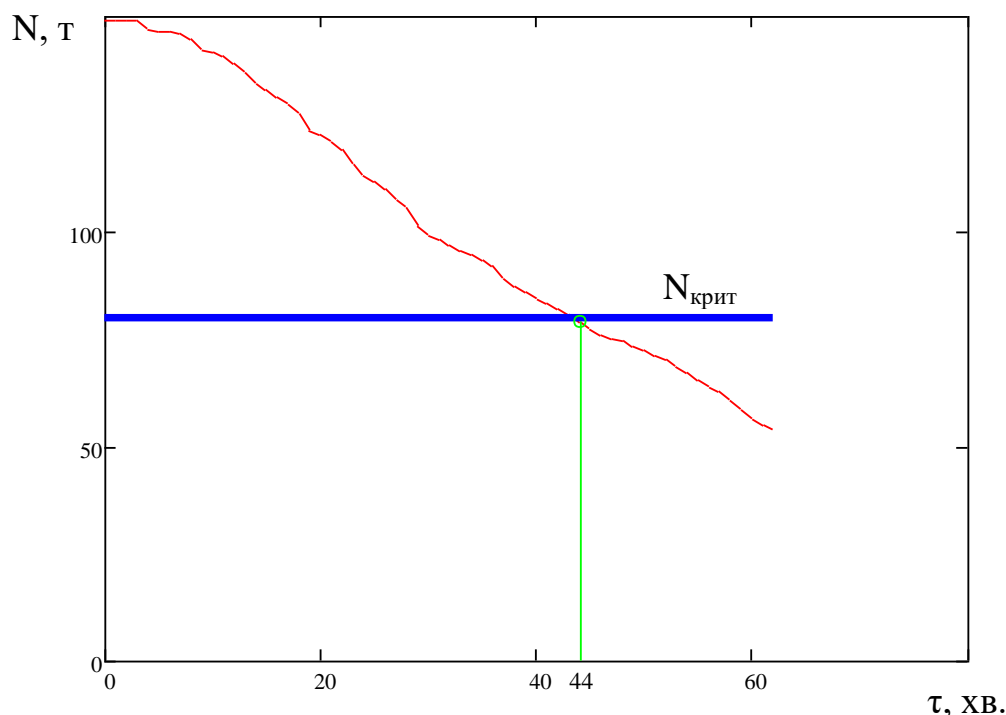


Рисунок 6.43 – Графік зниження несучої спроможності колони із заданими характеристиками (висота – 2,4 м, навантаження – 80 т)

На рис. 6.43 систематизовано отримані результати. Дані колони відповідали характеристикам зразка й температурам прогрівання його шарів під час експерименту. Додатково введено дані щодо висоти виробу й навантаження, що запроектоване в ході роботи залізобетонної конструкції в будівлі. Їх зміна вможливіє визначення межі вогнестійкості для колон інших габаритів та з іншим робочим навантаженням.

Для прикладу зміни вхідних даних розрахунку на рис. 6.45 представлено розрахункове оцінювання межі вогнестійкості колони з перерізом, що нагрівалась у печі, але довжиною 3 м та навантаженням 100 т.

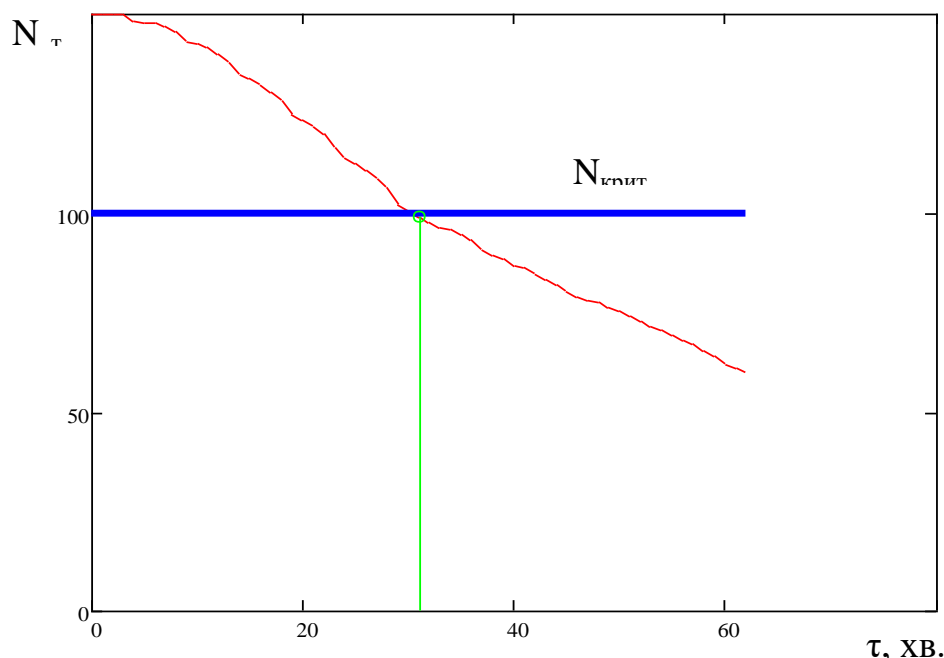


Рисунок 6.44 – Графік зниження несучої спроможності колони із заданими характеристиками (висота – 3 м, навантаження – 100 т)

Дані, відображені на рис. 6.44, засвідчують адекватність розрахунку: за збільшення навантаження на колону та її довжини оцінка вогнестійкості знизилася з 44 хвилин до 31 хвилини.

6.3.4 Порівняльний аналіз оцінювання межі вогнестійкості колони.

Адекватність запропонованого методу вивчено через порівняння експериментальних даних, описаних у літературі, із результатами розрахунку. Отримано величини можливих похибок.

Проаналізовано залізобетонну колону $200 \times 200 \times 2400$ із важкого бетону на гранітному заповнювачі. Робоча арматура А400С, поперечна арматура А240С (рис. 6.15). Геометричні параметри взято з [136].

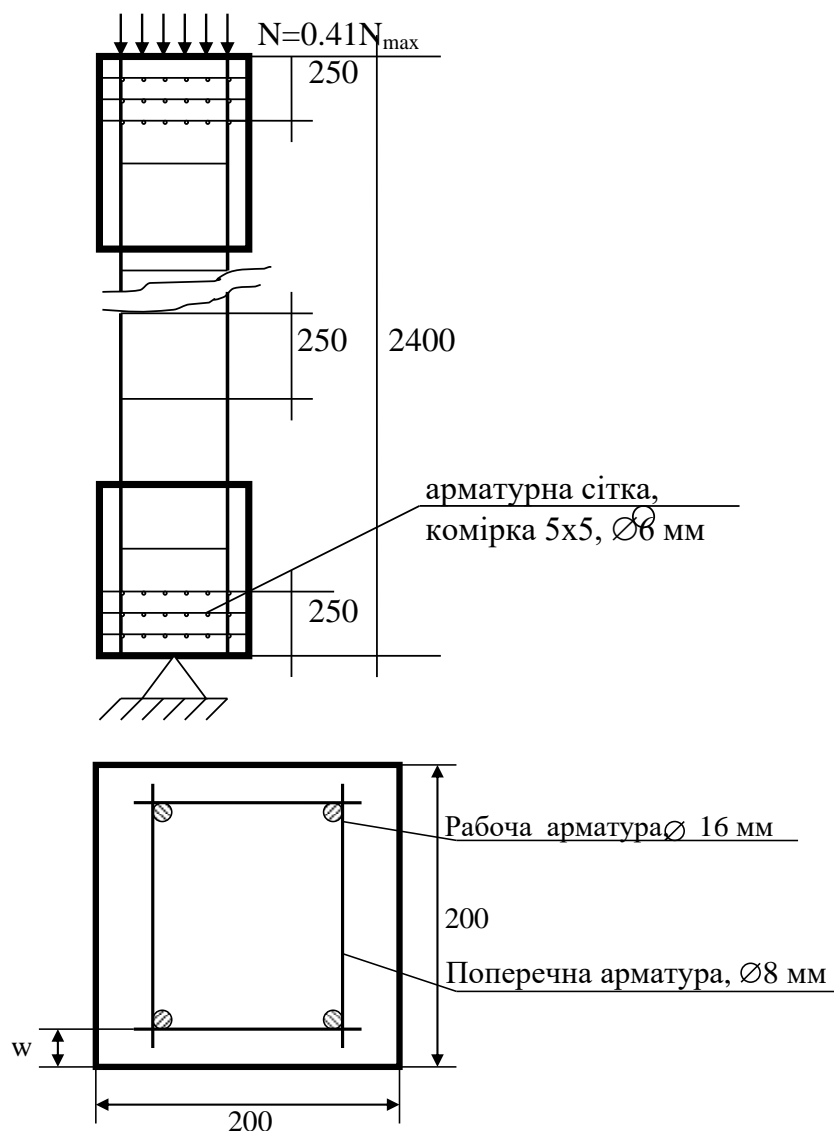


Рисунок 6.45 – Розрахункова схема залізобетонної колони під час експериментальних досліджень

У [136] представлено дані випробувань залізобетонних колон для різних класів міцності бетону, різних діаметрів арматури й різних товщин захисного шару за збереження подовжньої сили, що діє, і геометричних розмірів колон.

На підставі всіх даних виконано розрахунок за розробленим алгоритмом із використанням експериментальних даних із [136] про температури й параметри випробуваних колон. Порівняльні дані результатів розрахунку та експерименту узагальнено в табл. 6.10.

Дані аналізу адекватності результатів розрахунку за розробленим методом

Захисний шар бетону, мм	Характеристики бетону		Характеристики арматури		Стискаюча сила, т	Відхилення температури середини колони, %	Межа вогнестійкості, що отримано експериментально, хв.	Розрахункова межа вогнестійкості, хв.	Відносне відхилення, %
	Тип	Клас міцно	Клас міцно	Діаметр, тр,					
35	0	C20/25	A400	16	82	7	49	44	8,3

Дані, отримані під час експериментальної частини, і дані експериментально-розрахункового методу відрізняються на 8,3 %. Це вмотивоване аналогічними результатами, отриманими в ході аналізу випробувань колон. Як і в разі з колонами, кількісний показник межі вогнестійкості доводить високу збіжність результатів. Крім того, у ході експериментальних досліджень межа вогнестійкості не була нижчою, що також засвідчує перспективність розробленої методики.

6.4. Методики оброблення експериментальних даних для оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних стін

6.4.1. Адекватність розрахунку температурного поля в стінових фрагментах за результатами експериментальних досліджень. У розділі 2.2 розроблено методи апроксимації температурних розподілів на основі точкових замірів температури, що отримані в ході вогневих експериментів. Один із методів заснований на інтерполяції температурних полів у перерізі конструкції без використання вимірювань усередині зразків. Щоб побудувати криві розподілу температур, достатньо отримати дані температури тільки на обігрівальній і необігрівальній поверхнях стіни. Такого результату досягають через заміну в

моделі теплопередачі (2.1) – (2.4) із граничних умов III роду на граничні умови I роду [306–325].

Недолік цього підходу полягає в тому, що для розв'язування задачі теплопровідності потрібно окремо добирати просторовий і часовий кроки. Автоматичне добирання кроків ускладнене великими стрибкоподібно змінними значеннями теплоємності й теплопровідності матеріалів елементів з одностороннім прогрівом.

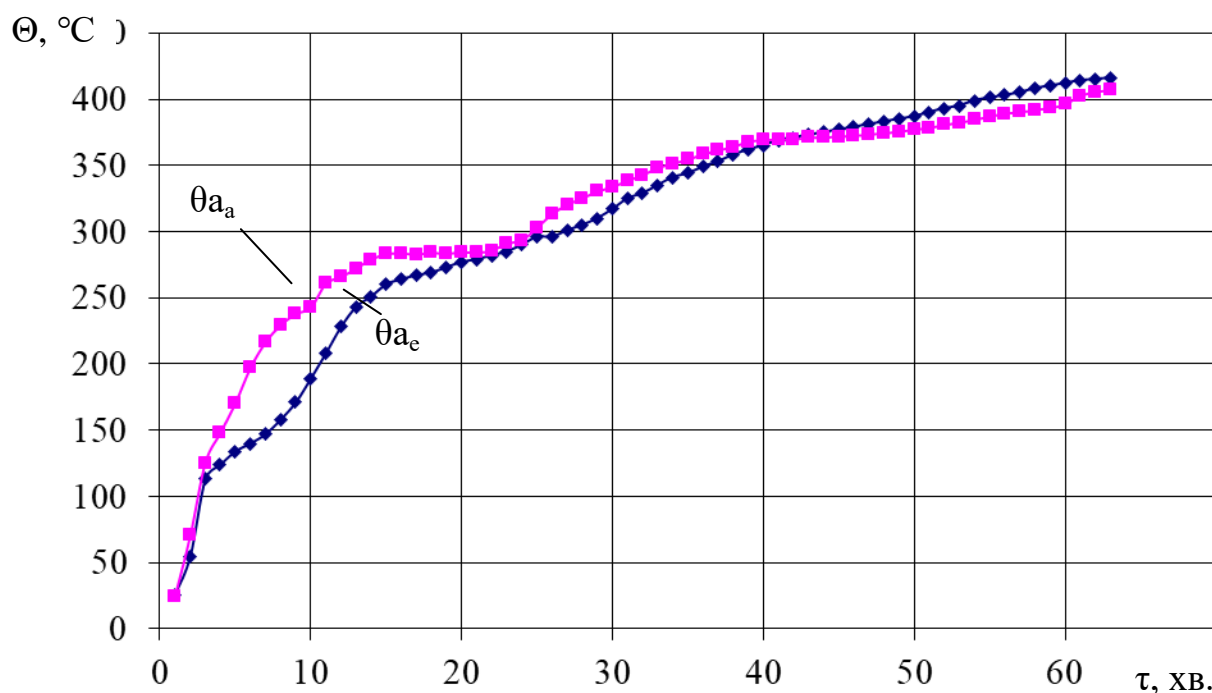


Рисунок 6.46 – Прогрів фрагмента залізобетонної стіни на рівні арматури: θ_{a_a} – дані апроксимації; θ_{a_c} – середня температура відповідно до показників термопар під час експериментальних досліджень (рис. 5.16)

Використано математичні вирази (2.12) – 2.13) і дані, зазначені в таблиці 2.2. Адекватність результатів необхідно перевіряти. Для цього передбачено контроль зміни температури в середній частині фрагмента залізобетонної стіни (рис. 5.13) та на рівні арматури всередині конструкції (рис. 5.11).

Відповідно до алгоритму, представленого в розділі 2.2, виконано розрахунки й побудовано графіки прогрівання в точках розміщення термопар

усередині стіни на основі замірів температури на обігрівній і необігрівній сторонах, а потім порівняно результати з експериментальними даними. На рис. 6.46 і 6.47 порівняно графіки розрахункових та експериментальних даних [306–325].

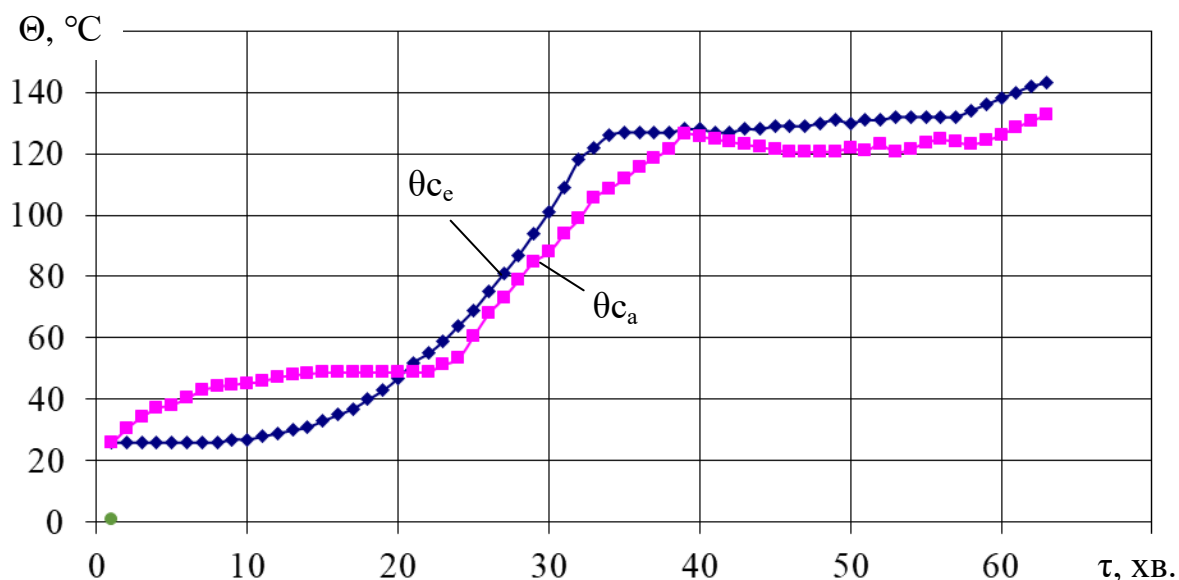


Рисунок 6.47 – Прогрів фрагмента залізобетонної стіни на 110 мм (середина конструкції): $\theta_{с_а}$ – дані апроксимації; $\theta_{с_е}$ – середня температура відповідно до показників термопар під час експериментальних досліджень (рис. 5.16)

Аналіз графіків на рис. 6.46 і рис. 6.47 засвідчив, що дані, отримані внаслідок застосування запропонованого методу інтерполяції, є достатньо точними, оскільки перебувають у межах експериментальної похибки. Щоб оцінити, наскільки якісно математична модель відтворює результати експериментів, необхідно отримати кількісні показники її адекватності. За допомогою виразів 5.1 – 5.6 визначено критерії Фішера, Стьюдента та Кохрена.

У табл. 6.11 систематизовано результати розрахунків відносного відхилення та критеріїв адекватності, відповідно до даних експериментів та розрахунків.

Параметри дисперсії

Зона термопари (рис. 6.1 – рис. 6.2)	Максимальне відхилення, °C	Середнє відхилення, °C	Відносне відхилення, %	F-критерій	Критичне значення F- крит. [181]	t-критерій	Критичне значення θ - крит. [181]	Q-критерій	Критичне значення Q- крит. [181]
$\theta_{a_c}; \theta_{a_a}$	71	17	4,3	1,9	4,49	1,3	2,92	0,32	0,45
$\theta_{c_c}; \theta_{c_a}$	19	10	6,7	1,6		1,4		0,43	

Згідно з таблицею 6.11, розраховані критерії адекватності (t-критерій Стьюдента, Q-критерій Кохрена, F-критерій Фішера) не перевищують критичних значень.

6.4.2. Оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних стін за результатами вогневих випробувань без механічного навантаження. У ході вогневих випробувань під час нагрівання залізобетонної стіни без механічного навантаження за стандартним температурним режимом пожежі в малогабаритній вогневій печі отримано результати прогріву в необхідних контрольних точках для розрахунку. Наступний етап – оцінювання вогнестійкості елемента конструкції за несучою здатністю розрахунковим способом.

Методика дає змогу на основі відомостей, одержаних у ході експериментальної частини (одностороннє нагрівання залізобетонної стіни за стандартною температурною кривою пожежі у вогневій печі без механічного навантаження, згідно з вимогами стандартів [2; 32]), оцінити межу вогнестійкості залізобетонних стін за несучою здатністю в разі розрахунку на міцність (рис. 6.48).

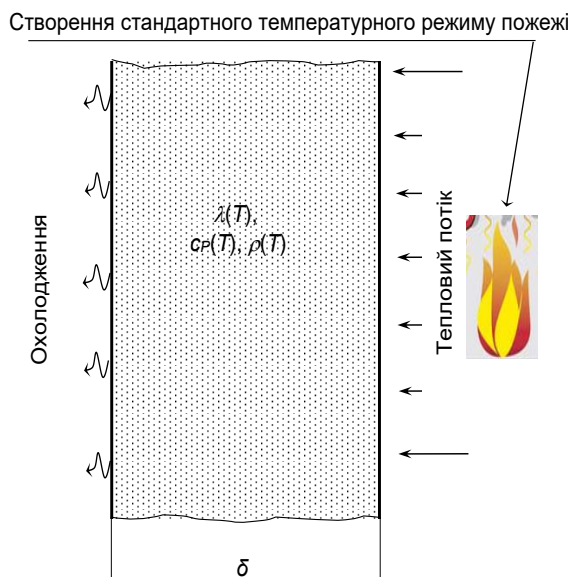


Рисунок 6.48 – Розрахункова схема моделі теплопередачі під час нагрівання стінового елемента

Загальна експериментально-розрахункова методика допомагає випробовувати стінові елементи будівельних конструкцій на вогнестійкість за температурним режимом, згідно з [2], без прикладання механічного навантаження, що беруть до уваги на етапі розрахунку. Вхідні дані – експериментальні.

Методику використовують для визначення межі вогнестійкості стінових елементів будівельних конструкцій, що зазнають впливу теплового потоку за одностороннього обігріву.

Методика дає змогу проаналізувати зміни механічних властивостей кожного шару бетону й арматурної сталі, залежно від температури нагрівання. Схему обігріву стінового елемента представлено на рис. 6.48. Зміну міцності залізобетонного елемента беруть до уваги під час розгляду параметрів напружено-деформованого стану в перерізі стіни, відповідно до шарнірної схеми її закріплення, геометричних параметрів, класу міцності бетону й арматурної сталі. Рівняння, що описують напружено-деформований стан, узяті відповідно до рекомендацій EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2 [103].

На рис. 6.49 проілюстровано розташування термопар і розбиття перерізу стіни на зони.

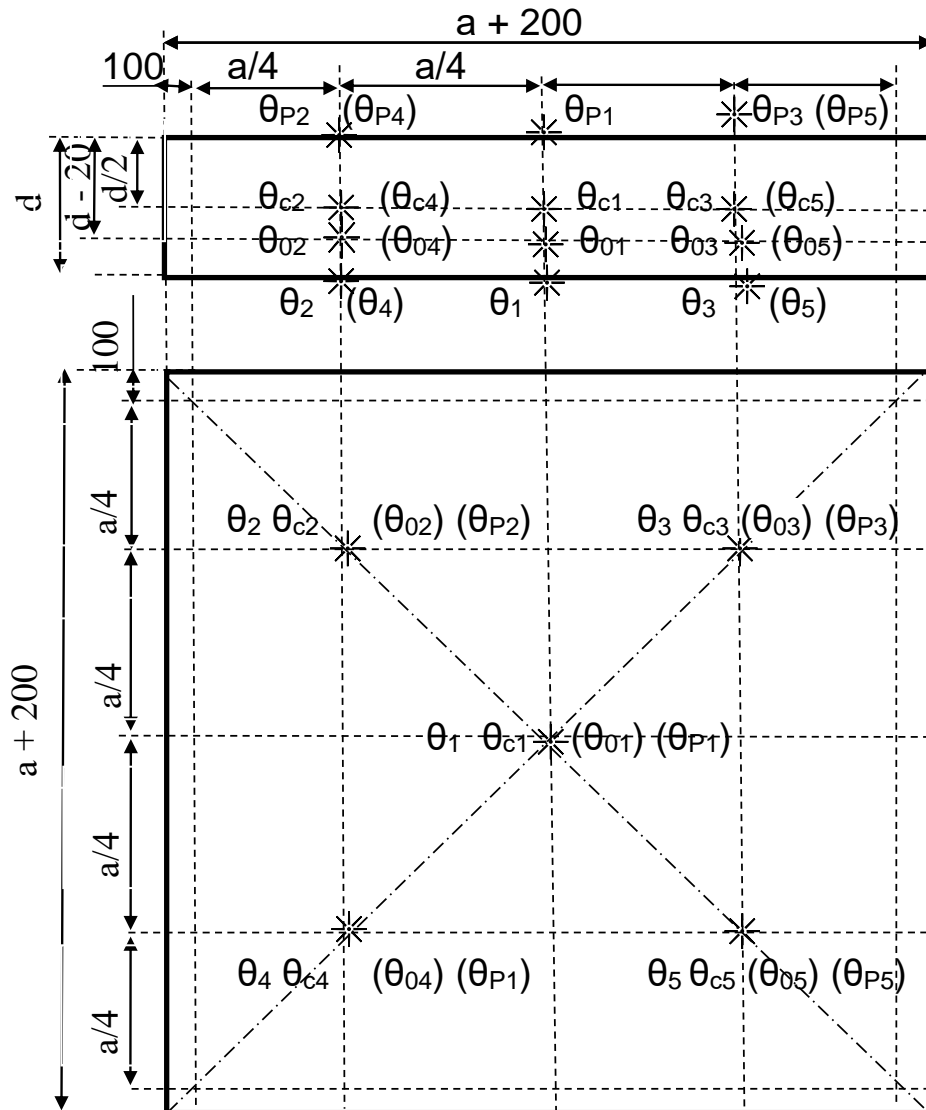


Рисунок 6.49 – Схема розташування місць контролю температури і розбиття перерізу стіни на зони

Для вивчення зміни механічних властивостей залежно від температури проведено інтерполяцію температур у вузлових точках перерізу за застосування значень температур, які виміряні в контрольних точках перерізу в ході випробувань [306–325].

Спосіб інтерполяції передбачає виконання низки процедур.

1. Для виконання завдання граничні умови на обігрівній поверхні стінового елемента записують у вигляді:

$$\theta|_{x=b} = \theta_W \quad (6.20).$$

2. На необігрівній поверхні стіни вираз (6.1) ГУ III роду записують у вигляді:

$$\theta|_{x=0} = \theta_n \quad (6.21),$$

де θ_W , θ_n – середні значення температур, відповідно на обігрівній і необігрівній поверхнях у контрольні моменти часу, що отримують протягом випробувань за показниками термопар, згідно з методикою випробувань, описаною в нормативних документах [1; 2] Для розв’язування теплотехнічної задачі запропоновано застосувати нормативні теплофізичні характеристики [60].

Задачу розв’язано відповідно до алгоритму, описаного в п. 2.1.1 із застосуванням формул (6.3) – (6.7).

Згідно з рекомендаціям [195], конвективний і радіаційний складники коефіцієнта теплообміну можна визначити з виразів:

$$\begin{aligned} \alpha_K &= 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) - \text{поверхня, що обігривається;} \\ \alpha_K &= 6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) - \text{поверхня, що не обігривається;} \end{aligned} \quad (6.22)$$

$$\alpha_P = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{\theta_W^4 - \theta_P^4}{\theta_W - \theta_P}$$

де ε – ступінь чорноти поверхні матеріалу стіни $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4)$ – константа Стефана – Больцмана.

Початкова температура матеріалу стіни та навколишнього середовища $T_0 = 293$ К.

Температуру пожежі визначають за формулою (1.1), що виражає стандартний температурний режим пожежі.

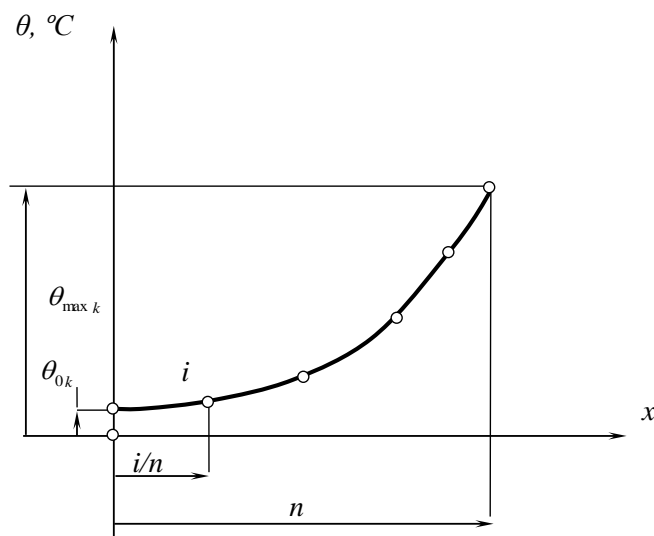


Рисунок 6.50 – Схема апроксимації температурних розподілів стін під час випробувань на вогнестійкість

Загальну блок-схему розрахунку апроксимації продемонстровано на рис. 6.51. Алгоритм розрахунку заснований на представленні температурних кривих узагальненим виразом:

$$\theta_{k,i} = \theta_{0k} + (\theta_{\max k} - \theta_{0k}) \left[\frac{i}{n} \right]^{Q_k} \quad (2.23),$$

де $\theta_{k,i}$ – температура i -тої точки перерізу стіни (див. рис. 6.50) у k -тий момент часу; θ_{0k} , $\theta_{\max k}$ – температура першої та останньої точок у k -тий момент часу; n – кількість інтервалів між контрольними точками; Q_k – показник ступеня параболи у k -тий момент часу, що визначають за алгоритмом, поданим на рис. 6.51.

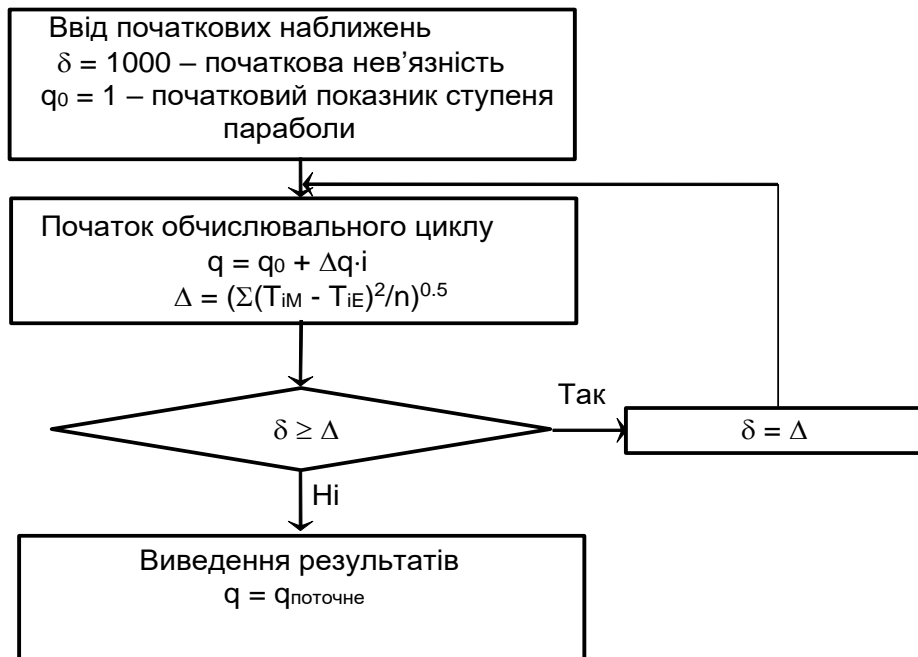


Рисунок 6.51 – Блок-схема алгоритму визначення показника ступеня апроксимувального поліному

Після розрахунку температурного поля необхідно виконати розрахунок міцності стіни. Аналіз методики розрахунку для колони вможливує створення часткового випадку для стіни. Різницею стане використання одностороннього обігріву, отже, необхідність урахувувати втрату цілісності та теплоізолювальної спроможності. На рис. 6.52 проілюстровано метод розбиття стіни на зони. Показники цілісності й теплоізолювальної спроможності беруть до уваги як на етапі експериментальних досліджень, так і під час розрахунків. Необігрівна поверхня стін не прогрілася на температуру, що перевищує 140 °С, що засвідчує можливу втрату міцності лише за показником несучої здатності.

Аналіз рис. 6.52 дає змогу сформулювати уявлення про стіну як про ряд колон, що обігріваються односторонньо. Варто використати математичний апарат для визначення міцності колон під час нагрівання.

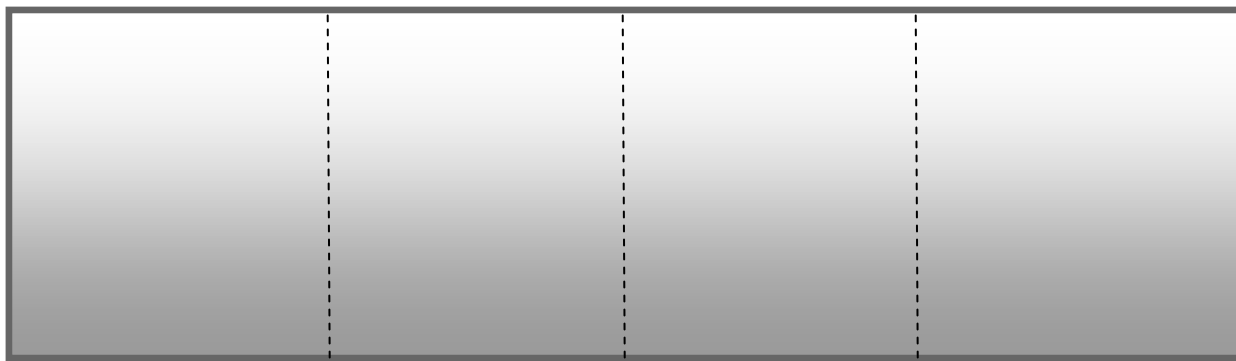


Рисунок 6.52 – Розбиття стіни на зони для розрахунку міцності

Для оцінювання межі вогнестійкості залізобетонних стінових елементів за результатами нагрівання в спеціальній малогабаритній вогневій печі необхідні такі дані: показники термопар у кожену хвилину випробувань згідно зі схемою на рис. 6.49; клас міцності бетону й арматури; тип крупного заповнювача бетону; діаметри арматури, а також кількість і розташування стержнів, що зображено на рис. 6.50. Потрібно зафіксувати дані щодо геометричних розмірів перерізу стіни та захисного шару бетону, розрахункової висоти стіни й розрахункового розподіленого навантаження.

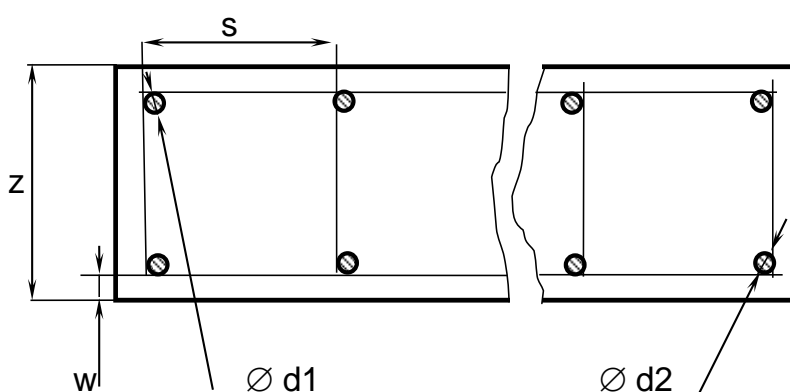


Рисунок 6.53 – Схема розташування та діаметри арматури стіни

На рис. 6.54 представлено лістинг сторінки введення початкових даних, а на рис. 6.55 – лістинг сторінки результатів.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Показані термометри	Обогреваемая поверхность	Необогреваемая поверхность	Арматура (рабочая)	Вертикальное перемещение	Горизонтальное перемещение	Свойства бетона	Свойства арматуры со стороны обогреваемой поверхности	Свойства арматуры со стороны необогреваемой поверхности	Геометрические размеры	Высота стены h, м	Шаг арматуры на стену, с, мм/2	Расчетная сила				
ТВ, °С	Т2, °С	Т2, °С	Тст, °С	м, м	м, м	Класс прочности	Тип	Класс прочности	Диаметр d, м	Диаметр d, м	Диаметр d, м	Сечение	Толщина, м	Толщина защитного слоя, м	Расчетная сила	Давление
23	26	26	26	26	0.00019052	С 30/35	1	A500C	0.016	A240C	0.016	0.2	0.02	3.2	0.2	150

Рисунок 6.54 – Сторінка вводу початкових даних

$\Phi_{ПО} := \Phi_{p0}$ $RSC := \Phi_{p1}$ $N_f := \Phi_{p2}$
 Межа вогнестійкості стіни $\Phi_{ПО} = \text{"Межа вогнестійкості не досягнута"}$
 Ресурс несучої здатності стіни $RSC = 53.504\%$
 Графік зниження несучої здатності стіни

N, т

Рисунок 6.55 – Сторінка виведення результатів

6.1.3. Результати використання запропонованого методу. Доцільно розглянути конкретний приклад залізобетонної балки. На рис. 6.56 подано вигляд перерізу балки та схему його армування, відповідно до запропонованих у методиці (рис. 6.49 і рис. 6.50).

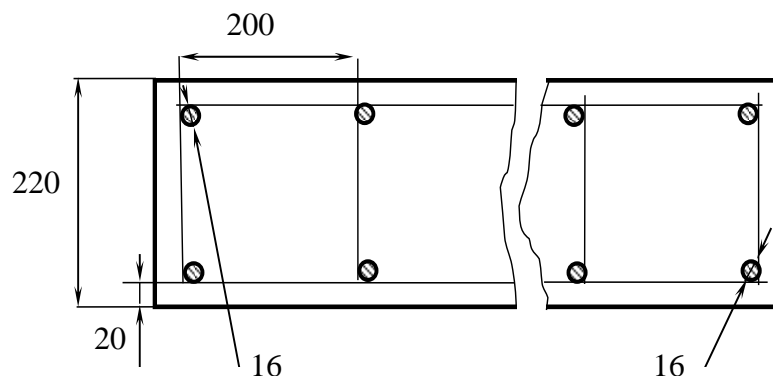


Рисунок 6.56 – Параметри перерізу стіни

Таблиця 6.12

Основні параметри залізобетонної стіни

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Геометричні розміри			
– висота	b	3,2	м
– товщина захисного шару	w	0,02	
– товщина	z	0,22	
Тип бетону	Важкий на гранітному заповнювачі	Клас С 30/35 (В30)	
Густина бетону	ρ_B	2230	кг/м ³
Робоча арматура:		Клас А240С	м
– діаметр більший	d_1	0,016	
– діаметр менший	d_2	0,016	
– крок	s	0,2	

Отримано розподіли температур, що представлено на рис. 6.57.

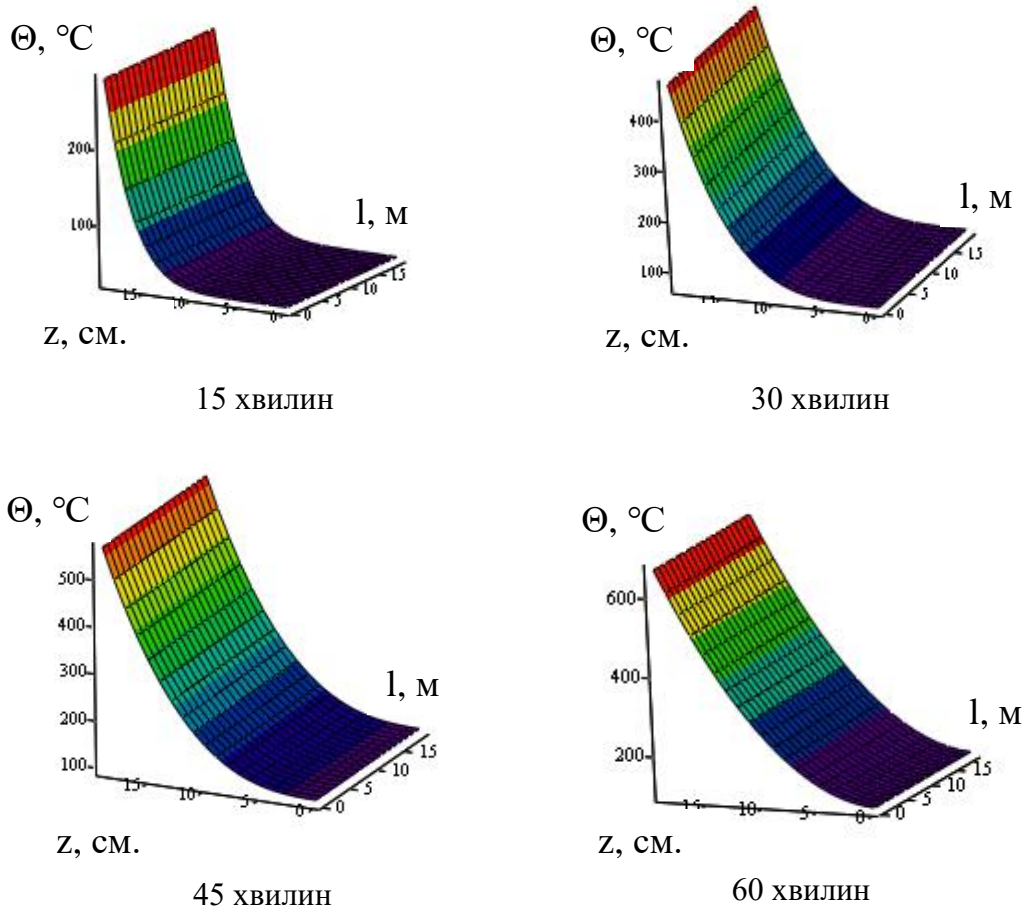


Рисунок 6.57 – Результати інтерполяції температур за значеннями температур у контрольних точках перерізу

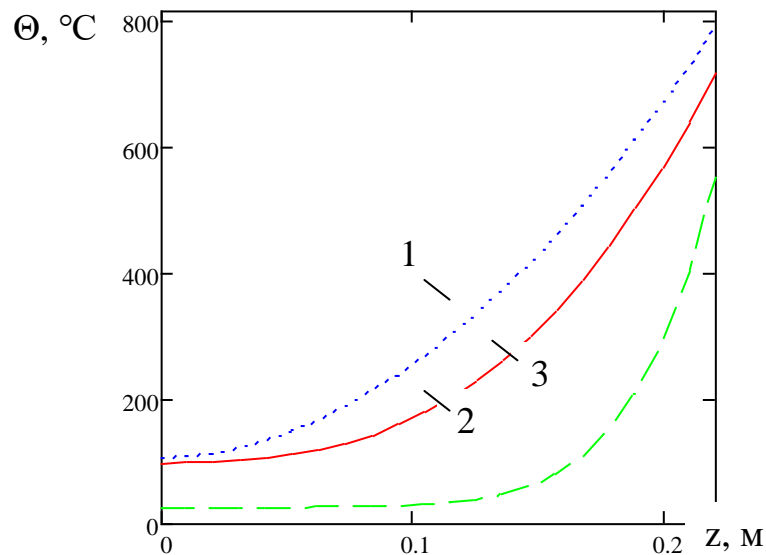


Рисунок 6.58 – Узагальнені результати інтерполяції температур за значеннями температур у контрольних точках перерізу

Для інтерполяції взято результати розрахунку теплової задачі для перерізу залізобетонної стіни, згідно з рекомендаціями [103]. Відповідно до рекомендацій EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2 [103], а також даних таблиці 6.12, побудовано міцнісні характеристики бетону й арматурної сталі, що представлено на рис. 6.59.

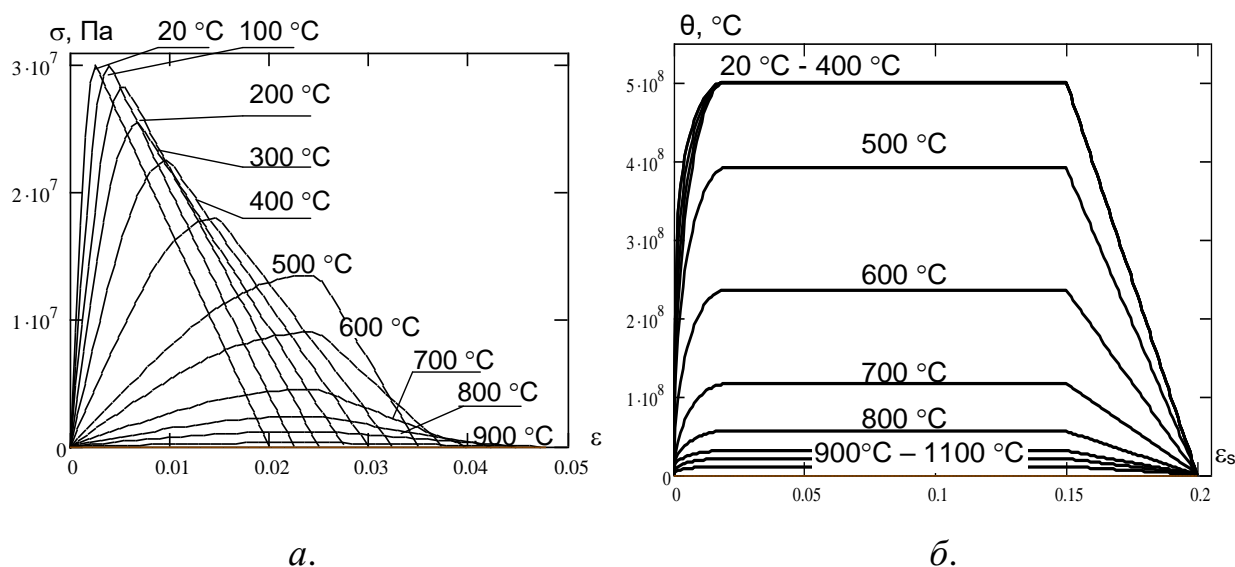


Рисунок 6.59 – Діаграми деформування бетону (а) та арматурної сталі (б)

Для розв'язування задачі міцності використано зонний метод, що полягає в розділенні перерізу на ушкоджені зони, що не здатні протидіяти силовій дії механічного навантаження, та зони, яка опирається механічним навантаженням на рівні ненагрітого бетону. Цей метод заснований на виконанні низки процедур [113–114].

1. Половину товщини перерізу поділити на n паралельних зон однакової товщини, де $n \geq 3$.
2. Для кожної із зон визначити середню температуру.
3. Визначити коефіцієнт зниження опору на стиск $k_c(\theta_i)$ для кожної із зон за діаграмою зниження міцності бетону, залежно від температури.
4. Визначити середній коефіцієнт зниження для перерізу елемента, зокрема коефіцієнт $(1-0,2/n)$, що важливий для розрахунку зміни температури кожної зони за формулою [113]:

$$k_{c,m} = \frac{(1-0,2/n)}{n} \sum_{i=1}^n k_c(\theta_i) \quad (6.24),$$

де

n – кількість паралельних зон у ширині w ;

w – половина повної ширини;

m – кількість зон.

5. Ширину пошкодженої зони перерізу балок, плит або інших зігнутих елементів розрахувати за формулою [113]:

$$a_z = w \left[1 - \frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right] \quad (6.25),$$

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

6. Для колон, стін та інших елементів конструкцій зі стискальними навантаженнями ширину пошкодженої зони визначити за формулою [113]:

$$a_z = w \left[1 - \left(\frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right)^{1,3} \right] \quad (6.26).$$

За отриманими значеннями максимальних моментів був побудований графік зниження несучої спроможності, що представлено на рис. 6.70.

Унаслідок розрахунку з'ясовано, що межа вогнестійкості за 60 хв. не настає, а ресурс несучої здатності становить 63 %. На рис. 6.60 продемонстровано графік зниження несучої спроможності стіни із запропонованими характеристиками.

На рис. 6.60 систематизовано отримані результати. Дані стіни відповідали характеристикам досліджуваного зразка й температурам прогрівання її шарів під час експерименту. Додатково введено дані щодо висоти стіни й розподіленого навантаження, що запроєктоване для роботи конструкції в будівлі. Їх зміна вможливить визначення межі вогнестійкості для стін інших габаритів та з іншим робочим навантаженням.

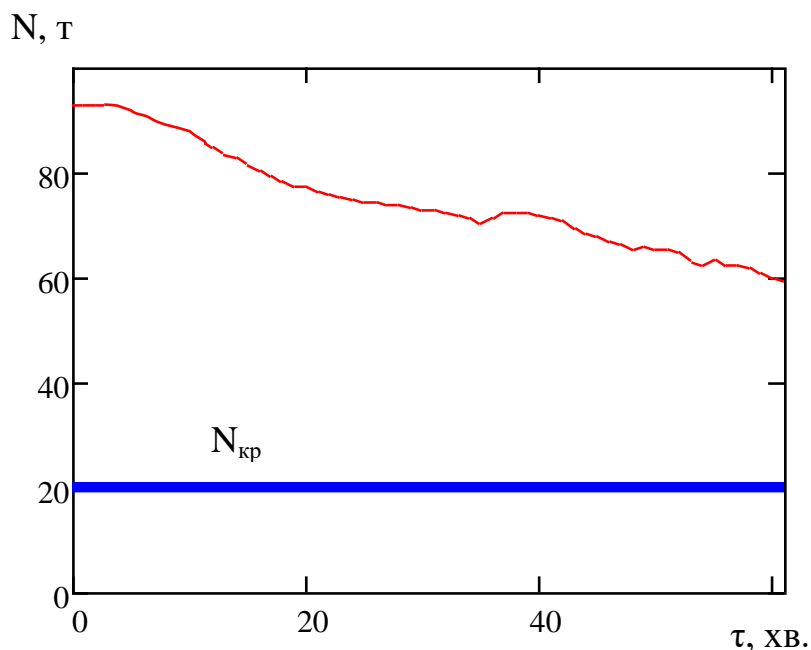


Рисунок 6.60 – Графік зниження несучої спроможності стіни висотою 3,2 м з вертикальною складовою сили 150 т

На рис. 6.60 продемонстровано зниження міцності стіни висотою 3,2 м із розподіленим навантаженням 150 т/м^2 , яка протягом години не досягає критичного значення відповідно до оцінки вогнестійкості.

6.4.4. Порівняльний аналіз оцінювання межі вогнестійкості стіни.

Порівняно результати, одержані за запропонованим методом, з експериментальними даними, що відомі з літератури. Отримано величини відхилень результатів запропонованого методу й випробувань на вогнестійкість схожих конструкцій у вогневих печах.

Додатково проведено розрахунок межі вогнестійкості балки аналогічного перерізу висотою 3,2 м із розподіленим навантаженням 350 т/м^2 . Для врахування більшого часу прогрівання виконано інтерполяцію результатів теплового впливу на стіну та розрахунок з описаною вище методикою. Результати розрахунку представлено на рис. 6.61.

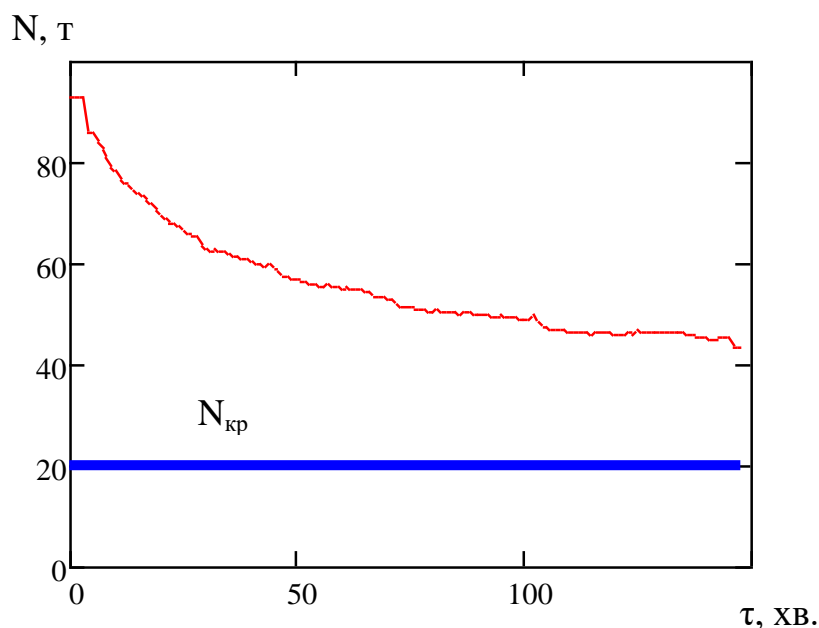


Рисунок 6.61 – Графік зниження несучої спроможності стіни довжиною 3,2 м із вертикальним складником сили 350 т, що випробовано протягом 150 хвилин

Згідно з рис. 6.61, межі вогнестійкості стіни досліджуваної товщини та параметрів армування, довжиною 3,2 м не досягнуто за 150 хвилин. Після 1 години випробувань міцність стіни майже не знижується, це можливо пояснити двома факторами: обігрів стіни односторонній; арматура, розташована з необігріваного боку, продовжує виконувати свої функції за умови цілісності захисного шару бетону; стіна має достатню протяжність, на відміну від колони, тому її міцність у кілька разів вища. Аналогічні дані відображено в [136].

У [136] систематизовано дані випробувань залізобетонних виробів, зокрема стінових елементів, для різних класів міцності бетону, різних діаметрів арматури та різних товщин захисного шару за розподіленого навантаження, що діє, різних товщин стін, а також виду армування.

Дані, отримані під час експериментального визначення, і дані експериментально-розрахункового методу підтверджують I ступінь вогнестійкості стіни з цими характеристиками. Отже, розрахунки адекватні.

Висновки до розділу 6

Обґрунтовано комплекс методик обчислення несучої здатності елементів залізобетонних будівельних конструкцій за результатами відновлення температурних полів у їхніх перерізах, що дає змогу оцінити межу вогнестійкості несучих будівельних конструкцій точніше за наявні.

На основі даних, отриманих за результатами нагрівання фрагментів у малогабаритній печі за стандартним температурним режимом пожежі, практично оцінено межу вогнестійкості повномасштабних несучих залізобетонних будівельних конструкцій. Відповідно до вибраних матеріалів для виготовлення фрагментів несучих конструкцій і запропонованих габаритів, отримані результати з оцінювання межі вогнестійкості: балка довжиною 4,75 м із навантаженням $2,5 \text{ т/м}^2$ – 45 хвилин; балки з ідентичним навантаженням, довжиною 1,5 м – 59 хвилин; плити довжиною 6 м із навантаженням $2,5 \text{ т/м}^2$ – 79 хвилин; колони висотою 2,4 м із вертикальним складником сили 80 т – 44 хвилини, висотою 3 м і силою у 100 т – 31 хвилина; стіни ж довжиною від 3,2 до 4 м та навантаженням від 150 до 300 т – межі вогнестійкості за 150 хвилин не досягнуто, що можливо пояснити одностороннім обігрівом стіни; виконання арматурою з необігрівальної сторони своїх функцій; наявність у стіні лише 2 ступенів свободи для коливань через протяжність конструкції.

За допомогою обчислювальних методів відтворено температурні розподілення в перерізах елементів залізобетонних будівельних конструкцій, що дало змогу дослідити адекватність відновлення полів температури на основі отриманих експериментальних даних. Похибка перебуває на рівні від 2,1 до 6,9 %, залежно від типу досліджуваної конструкції.

Розроблено методику обчислення несучої здатності елементів залізобетонних будівельних конструкцій за результатами обчислення температурних розподілів у перерізах досліджуваних елементів, що прогнозує межу вогнестійкості елементів будівельних конструкцій точніше за випробування на 9,5 % для стін; на 3 %; для плит; на 9,5 %; для балок; на 8,3 % для колон.

Дані, отримані під час експериментального визначення, і дані експериментально-розрахункового методу відрізняються. Це можна пояснити тим, що досліджувані елементи (стіни, плити, балки, колони), вогнестійкість яких визначено в печах, відповідно до розробленої технології, були виготовлені з використанням різних матеріалів (пісок, вода, щебінь та в'язуче), відрізнялися якістю і походженням. Проте кількісний показник межі вогнестійкості засвідчує високу збіжність результатів (для всіх видів конструкцій він не перевищив 10 %). Крім того, під час експериментальних досліджень межа вогнестійкості не була нижчою, що також доводить перспективність розрахункової методики.

У процесі розрахунку вогнестійкості плит і стін необхідно брати до уваги втрату цілісності ц теплоізолювальної спроможності, оскільки відбувається односторонній прогрів конструкцій. На ці показники зважають як на етапі експериментальних досліджень, так і в ході розрахунків. Температура на необігрівальній поверхні плит і стін не перевищила 140 °С та / або 180 °С у будь-якій точці на поверхні, цілісність не порушена.

РОЗДІЛ 7

СИСТЕМА ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕСУЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МАЛОГАБАРИТНИХ ВОГНЕВИХ ПЕЧЕЙ

7.1. Елементи системи, зв'язок та відношення між ними

Система оцінювання вогнестійкості несучих елементів залізобетонних будівельних конструкцій – це комплекс експериментальних і розрахункових процедур, що засновані на розроблених методиках [284–325] для визначення межі вогнестійкості елемента залізобетонних конструкцій або для перевірки його відповідності нормованому часу.

У спрощеному вигляді систему представлено на рис. 7.1.

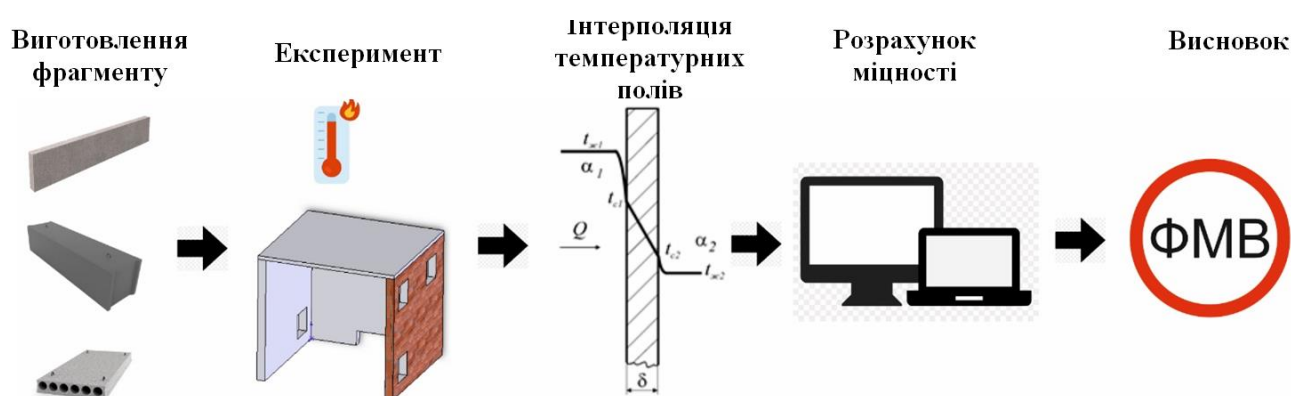


Рисунок 7.1 – Загальна схема системи оцінювання вогнестійкості несучих елементів залізобетонних будівельних конструкцій

Система оцінювання вогнестійкості несучих елементів залізобетонних будівельних конструкцій має елементи та зв'язки між ними. Спеціально розроблено та створено експериментальні й розрахункові методики для кожного з основних видів елементів залізобетонних конструкцій, проаналізовано взаємодію між ними. Описано кожен такий елемент окремо та схарактеризовано, як вони

пов'язані. На рис. 7.2 у більш широкому вигляді представлено систему з її елементами та зв'язками між ними.



Рисунок 7.2 – Система оцінювання вогнестійкості несучих елементів залізобетонних будівельних конструкцій

7.2. Засоби випробувальної техніки та умови виготовлення зразків

Проведені дослідження уможливили створення методики й розроблення на її основі технології для оцінювання вогнестійкості основних елементів залізобетонних будівельних конструкцій на підставі експериментально-розрахункового методу, із використанням малогабаритних вогневих печей. Підвищено ефективність випробувань на вогнестійкість завдяки забезпеченню їхньої достовірності, економічності та екологічності [326–328].

У цьому розділі схарактеризовано алгоритм та особливості поетапного застосування розробленої технології. Під час будівництва типових будівель використовують чотири види основних конструкцій (плити, стіни, балки та колони) у різних комбінаціях.

Для оцінювання вогнестійкості необхідно мати спеціальні засоби та досвідчений персонал (фахівця). На першому етапі відбувається підготовка зразків із матеріалів, із яких у майбутньому виготовлятимуть реальні зразки конструкцій. Далі необхідно провести теплотехнічні випробування з нагрівання зразків у спеціальній вогневій печі, приклад печі продемонстровано в розділі 4. Останній етап – проведення розрахунку, вхідними даними для якого є результати попереднього етапу.

У розділах 1 та 3 доведено, що найменш можливим розміром камери печі має бути $1 \times 1 \times 1$ м, оскільки саме ці габарити дають змогу забезпечити відстань у 0,8 м від факела полум'я до досліджуваних конструкцій. Проте можливі інші габарити камери. Найдоцільніше з погляду універсальності забезпечити пропорційність розмірів внутрішнього простору. Відповідно до розробленої технології, використано 2 пальники для нагрівання камери. Як паливо вибраний метан. Завеликі розміри камери здатні призвести до зайвих витрат палива та складності виготовлення установки. На рис. 7.3 продемонстровано загальну схему конструкції малогабаритної установки для проведення експериментальної частини технології оцінювання вогнестійкості елементів залізобетонних конструкцій.

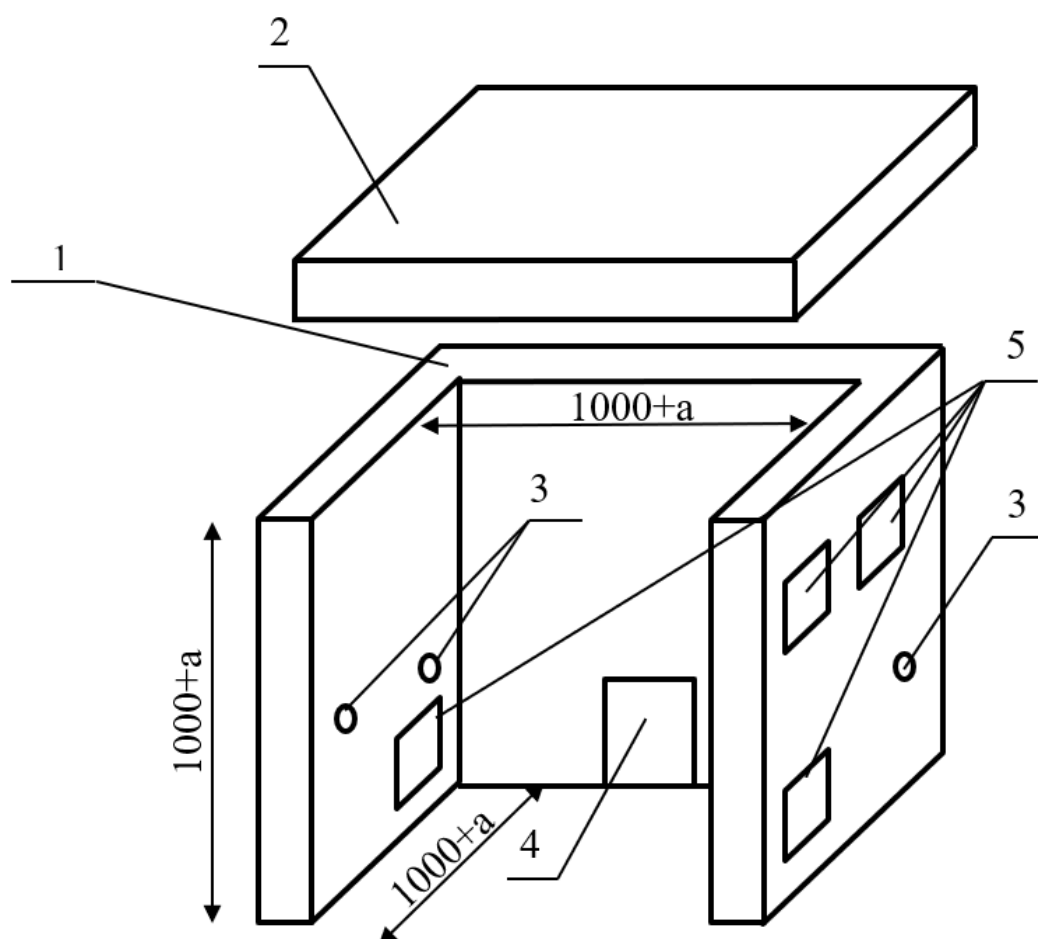


Рисунок 7.3 – Загальна схема конструкції малогабаритної установки для дослідження теплового впливу пожежі на будівельні конструкції: 1 – п-подібне огороження печі; 2 – знімні панелі; 3 – отвори для встановлення датчиків контролю температури; 4 – отвір для відведення продуктів горіння; 5 – отвори для встановлення пальників.

На рис. 7.3 проілюстровано принцип побудови малогабаритної установки, що має забезпечити достовірність експериментальної частини оцінювання вогнестійкості. Конструкція установки може бути змінена в межах запропонованого концепту. Основні елементи установки та їхні розміри можуть варіюватися. Відповідно до досліджень, проведених у розділах 4 та 5, необхідно дотримуватися основних принципів [309; 326–328].

1. Форма й розміри печі мають забезпечити умови завогневого впливу стандартного температурного режиму пожежі.

2. Найдоцільніша побудова універсальних установок, що мають П-подібну форму з відкритими двома частинами, які на час випробувань, за необхідності, закривають спеціальними кришками (рис. 7.3 (2)). Концепт виготовлення зазначених засобів описано в розділі 4.

3. Отвори для встановлення пальників мають бути розміщені так, щоб можливо було встановити пальники відповідно до виду фрагмента елемента залізобетонної конструкції; оптимальний приклад запропоновано на рисунку 7.3. Під час встановлення плит і балок найдоцільніше розташовувати їх у нижньому положенні, щоб лінії факелів полум'я не перетиналися. Інші отвори повинні мати можливість для закриття. Розміри отворів мають забезпечити встановлення пальників, але не перевищувати їхні розміри на 20 %.

4. Як паливо можливо використовувати газ (метан, пропан-бутан тощо). Відповідно до проведених у розділах 3, 4 і 5 досліджень, метан здатний забезпечити відтворення стандартного температурного режиму пожежі. Крім того, газоподібне паливо є більш екологічним та економним за рідке паливо. У разі використання рідкого палива необхідне встановлення додаткових засобів для розпилення палива, створення нагнітання повітря та / або спеціальних систем його подання.

5. Отвір (-и) для відведення продуктів горіння, відповідно до проведеного математичного моделювання (розділ 3), найдоцільніше розташовувати в задній нижній частині камери печі. Розміри отвору повинні мати можливість для варіювання, оскільки колони й балки встановлюють усередину печі, а стінові фрагменти та плити ззовні.

6. Місця встановлення термопар та їхня кількість залежать від розмірів і параметрів конкретної камери печі. У разі розробленого в розділах 3, 4 дизайну установки, найдоцільніше використовувати три термопари, що розташовані розосереджено в камері й не зазнають безпосереднього впливу теплового потоку від факелів полум'я за будь-якого встановлення.

7. Для більш ефективної роботи вогневої установки доцільно забезпечити якнайкращу герметизацію камери. Відповідно до тестових запусків, найсуттєвіший вихід тепла відбувався саме через нещільне прилягання кришок і фрагментів конструкцій до огороження печі.

8. Для якісного проведення розрахункової частини необхідно, щоб установка забезпечувала рівномірність прогріву по обігрівальній поверхні фрагментів елементів конструкцій. Щоб визначити доцільність побудови чи зміни параметрів установки, необхідно провести комп'ютерне моделювання тепломасоперенесення в камері запроектованої установки, як це описано в розділі 3.

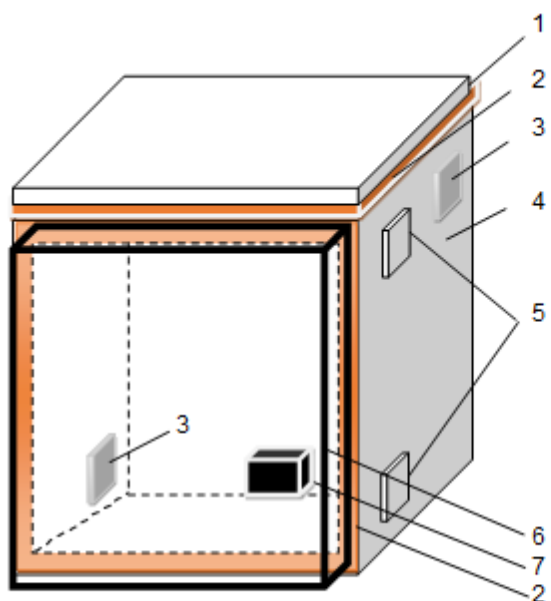
7.3. Умови виготовлення та підготовки фрагментів елементів залізобетонних конструкцій для випробування в малогабаритних печах

Виготовлені для проведення експериментальних досліджень фрагменти елементів конструкцій описано в розділі 5. Необхідно сформулювати основні принципи щодо їхньої підготовки для випробувань відповідно до розробленої технології.

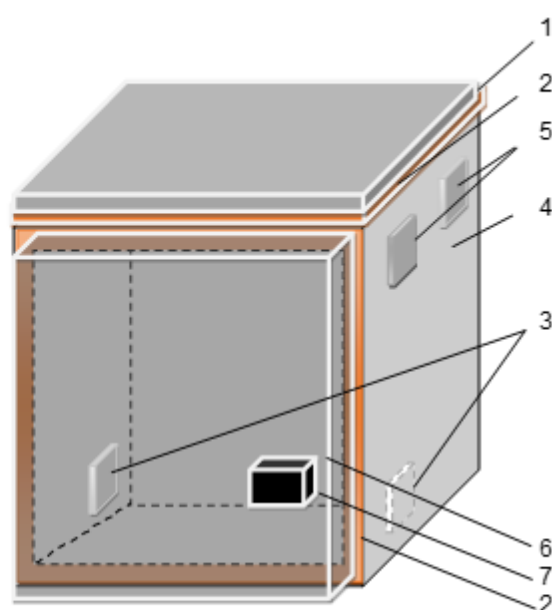
1. Фрагменти елементів усіх типів конструкцій виготовляють із матеріалів та за технологією, що повністю повторює виготовлення повномасштабної конструкції в майбутньому. Недоцільно допускати використання іншого виду матеріалів, навіть, якщо його характеристики згідно із сертифікатами відповідають запланованим. Пісок, в'язуче, крупний заповнювач, вода та домішки (у разі їх використання) повинні бути саме тими, що використовуватимуть під час виготовлення реальних елементів.

2. Фрагменти елементів залізобетонних конструкцій для проведення випробувань виготовляють із перерізами (товщиною в разі стінових елементів та плит), ідентичними до повномасштабних конструкцій у майбутньому.

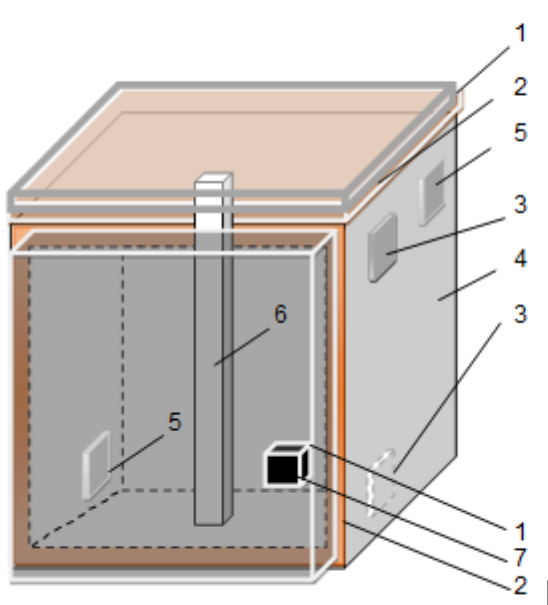
3. Інші габаритні розміри зразків (ширина й висота стін, довжина плит і балок, висота колон) мають відповідати розмірам камери випробувальної установки.



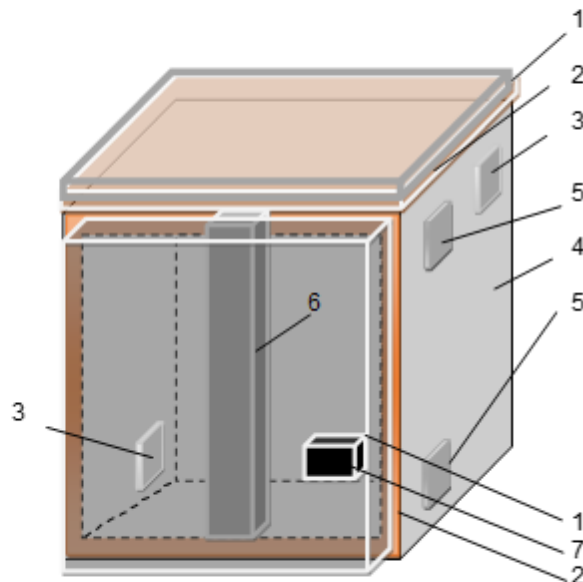
фрагмент стіни



фрагмент плити



фрагмент колони



фрагмент балки

Рисунок 7.4 – Схеми установлення фрагментів елементів залізобетонних конструкцій у малогабаритну установку: 1 – кришка, що закриває верхню частину установки; 2 – ущільнювач із мінеральної вати й вапняного шнура; 3 – пальники, що створюють температурний режим у камері печі; 4 – огороження печі; 5 – місця для пальників, що не використовують під час вогневих випробувань стін; 6 – фрагмент елементів залізобетонної конструкції; 7 – отвір виходу продуктів горіння

У разі з випробуванням стінових елементів і фрагментів плит необхідно передбачати, що елементи зазнають одностороннього обігріву та встановлені із зовнішнього боку печі. У цих випадках габаритні розміри фрагментів повинні бути ширшими за розміри камери мінімально на 100 мм із кожної зі сторін. Балки та колони мають бути виконані з можливістю встановлення мінераловатного ущільнювача в частинах, що прилягають до кришок. Схеми установки конструкцій подано на рисунку 7.4.

4. Схема армування та арматура мають бути такими, що використовуватимуть для виготовлення елементів реальних розмірів.

5. Для перевірки адекватності результатів випробувань доцільно виготовляти щонайменше три аналогічні фрагменти елемента залізобетонної конструкції.

6. Зразки варто виготовляти за допомогою стандартної розбірної опалубки та витримувати їх у ній упродовж семи діб. Після розпалубки фрагменти мають зберігатися протягом 28 діб [2; 31–34]. Після 28-денного витримання фрагменти можуть зберігатися в нормальних умовах температури й вологості до початку випробувань.

7. Транспортування зразків до місця випробувань має забезпечити їхню цілісність.

7.4. Встановлення вимірювальної арматури та засоби фіксації результатів випробувань

Для контролю температури в камері печі малогабаритної установки використано термопари ТХА-2388 із діаметром дроту 1,25 мм (рис. 4.4). Їх можна застосовувати для вимірювання температури в діапазоні від 0 до 1300 С. Використовують і термопари з неізольованими проводами або термопари, покриті захисним кожухом, який має бути видалений (відрізаний і знятий) на довжині не менше від 25 мм від вимірювального спаю термопари. Вимірювальний спай термопари повинен бути звареним. Температуру в печі потрібно вимірювати

термопарами не менше ніж у п'яти місцях. На кожні $1,5 \text{ м}^2$ отвору печі, що призначена для випробування огорожувальних конструкцій, і на кожні $0,5 \text{ м}$ довжини або висоти печі, призначеної для випробування стрижневих конструкцій, має бути встановлена одна термопара. Вимірювальний спай термопар доцільно встановлювати на відстані від 90 до 110 мм від поверхні зразка. Відстань від вимірювального спаю термопар до стінок печі має бути не менше від 200 мм [2].

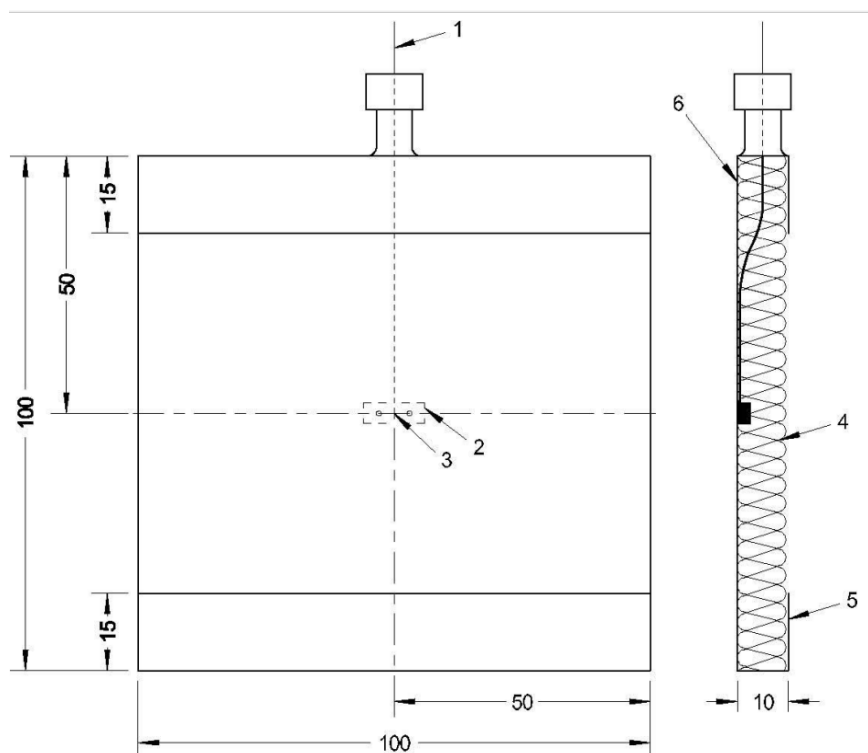


Рисунок 7.5 – Будова пластинчастого термометра відповідно до [50]: 1 – термопара в оболонці з ізольованим гарячим спаєм; 2 – сталева смужка, прикріплена точковим зварюванням або гвинтами; 3 – гарячий спай термопари; 4 – теплоізоляційний матеріал (орієнтований у напрямку зразка для випробування); 5 – смужка зі сплаву нікелю товщиною $(0,7 \pm 0,1)$ мм 6 – бік «А»

Відповідно до положень нормативних документів, що перебувають на стадії впровадження: ДСТУ EN 1363-1:202_ (EN 1363-1:2020, IDT) «Випробування на вогнестійкість. Частина 1. Загальні вимоги», ДСТУ EN 1363-2:202_ (EN 1363-2:1999, IDT) «Випробування на вогнестійкість. Частина 2. Альтернативні і додаткові процедури», ДСТУ ENV 1363-3:202_ (ENV 1363-3:1998, IDT) [96–98] – термопари в

печі мають являти собою пластинчасті термометри, тобто збірки, які складаються з вигнутої пластини, виготовленої зі сплаву нікелю, термопари, прикріпленої до неї, і теплоізолювального матеріалу.

Вигнута металева пластина повинна бути виготовлена зі смужки спеціального аустенітного сплаву на основі нікелю, стійкого до окислення за високої температури, довжиною (150 ± 1) мм, шириною (100 ± 1) мм і товщиною $(0,7 \pm 0,1)$ мм, зігнута так, щоб забезпечити будову, проілюстровану на рисунку 7.5.

Вимірювальний спай має складатися з дротів термопари типу «хромель – алюмель» (типу К) згідно з EN 60584-1[96], що перебуває в мінеральній ізоляції всередині оболонки, виготовленої із жаростійкого сталевого сплаву, номінальним діаметром у межах від 1 мм до 3 мм. Гарячі спаї повинні бути електрично ізольовані від оболонки. Гарячий спай термопари має бути закріплений у геометричному центрі пластини в точці, що показана на рисунку 1, за допомогою смужки невеликого розміру, виготовленої з того самого матеріалу, що й пластина. Смужку можна приварювати до пластини, також допустиме прикріплення смужки до пластини гвинтами для полегшення заміни термопари. Розміри смужки мають бути приблизно $18 \text{ мм} \times 6 \text{ мм}$ у разі її точкового приварювання до пластини, а в разі прикріплення до пластини гвинтами номінальні розміри дорівнюють $25 \text{ мм} \times 6 \text{ мм}$. Діаметр гвинта повинен бути 2 мм.

Збірку, що складається з пластини й термопари, потрібно оснащувати накладкою, виготовленою з неорганічного ізоляційного матеріалу, із номінальними розмірами $(97 \pm 1) \text{ мм} \times (97 \pm 1) \text{ мм}$ і товщиною $(10 \pm 1) \text{ мм}$, густина якого дорівнює $(280 \pm 30) \text{ кг/м}^3$.

Перед першим використанням пластинчастих термометрів складчасту частину потрібно піддати старінню через поміщення в піч, нагріту до $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, на 1 год. Можливий тепловий вплив на неї в печі для випробувань на вогнестійкість протягом 90 хв. (під час випробування за стандартним температурним режимом).

У разі використання багаторазового пластинчастого термометра потрібно вести записи щодо його використання, зазначаючи для кожного випадку факти

перевірки та тривалість користування. Термопару й теплоізолювальну накладку потрібно замінювати через кожні 50 год. теплового впливу в печі.

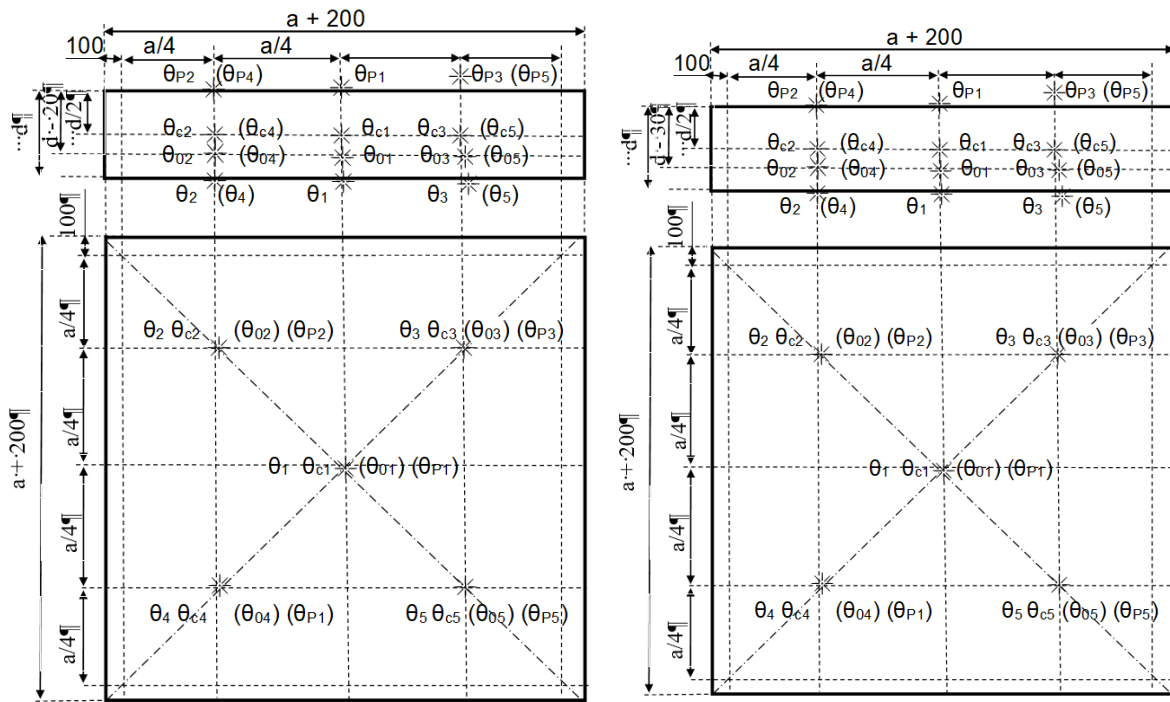
У таблиці 7.1 систематизовано мінімальний набір засобів вимірювальної техніки, що рекомендовано використовувати під час експериментальної частини розробленої системи.

Таблиця 7.1

Засоби вимірювальної техніки

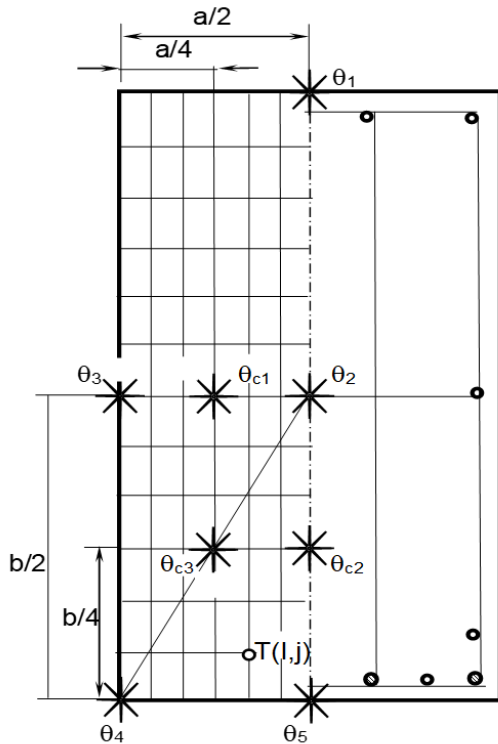
№ з/п	Найменування обладнання або приладу	Діапазон вимірювання	Похибка вимірювань
1	Лінійка вимірювальна	від 0 мм до 1000 мм	± 1 мм
2	Секундомір СОС пр-2б-2-000	від 0 с до 60 с, від 0 с до 60 хв	
3	Психрометр аспіраційний МВ-4М	від 10 % до 100 % від -10°C до 50°C	± 4 % $\pm 0,2$ $^{\circ}\text{C}$
4	Штангенциркуль ЩЦ-1	від 0 мм до 125 мм	$\pm 0,1$ мм
5	Барометр-анероїд М67	600 - 800 мм рт. ст.	± 1 мм рт. ст.
6	Анемометр АСО-3	від 0,3 м/с до 5 м/с	$\pm (0,1+0,05V)$ м/с
7	Термопары: – ТХА-2388* – Пластинчаті термометри	від -200 до $+700$ $^{\circ}\text{C}$ від $+700$ до $+1350$ $^{\circ}\text{C}$	$\pm 2,0$ $^{\circ}\text{C}$ $\pm 4,0$ $^{\circ}\text{C}$

На рисунку 7.6 систематизовано схеми розміщення термопар.

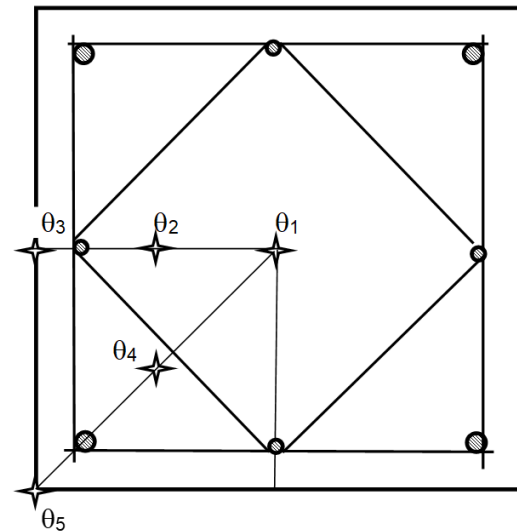


У фрагментах стін

У фрагментах плит



У фрагментах балок



У фрагментах колон

Рисунок 7.6 – Схеми розташування термопар та розбиття фрагментів елементів залізобетонних конструкцій на перерізи

На рисунку 7.4 продемонстровано місця встановлення термопар у всі основні види фрагментів елементів залізобетонних конструкцій. У разі випробування стін і плит

кількість термопар можна зменшити, оскільки для розрахунку використовують лише середнє значення 5 термопар у кожному перерізі. Під час експериментів перевірено та порівняно отримані дані. У камері печі забезпечено рівномірний прогрів, тому показники температурних датчиків на одному рівні не мали суттєвих відхилень один від одного [309].

У розділі 4 описано, що для отримання цифрових значень температури в місцях установки термопар під час створення методики використано модуль АЦП на базі мікросхеми max. 31855, спеціально розроблений в інституті. Модуль дає змогу вимірювати температуру з чутливістю 0,25°C; працює у межах температурних значень випробувань і характеристик термопар. Особливість розробленого модуля полягає в тому, що він допомагає враховувати температуру холодних спаїв та автоматично корегує значення температури. Є доцільним використання подібних модулів перетворення даних, що надходять із засобів вимірювання.

У розділах 5 і 6 описано способи установлення засобів вимірювальної техніки всередині фрагментів елементів залізобетонних конструкцій, що необхідні й достатні для проведення розрахункової частини розробленої методики.

7.5. Умови проведення експериментальних досліджень із теплового впливу пожежі на фрагменти елементів конструкцій у малогабаритних печах

Місце проведення експериментальної частини розроблених методик залежить від розташування вогневої установки. Найдоцільніше їх розміщувати на заводах із виробництва будівельних конструкцій та в дослідно-випробувальних лабораторіях (полігонах) ДСНС України [284–328].

Основна вимога до виготовлення фрагментів конструкцій: матеріали, які входять до складу залізобетону, мають бути саме тими, із яких у майбутньому виготовлятимуть конструкцію. Вимоги до підготовки та встановлення конструкцій представлено в параграфі 7.2.

Під час експериментів потрібно вести протокол, де фіксувати дані, що стосуються проведених досліджень. Перед початком експериментів у протоколі зазначають:

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

Загальну методику проведення випробувань у компактній вогневій печі без механічного навантаження описано в параграфі 4.2.1. Методика полягає у впливі стандартного температурного режиму пожежі за наближеного до реального нагрівання елемента залізобетонного фрагмента. На основі отриманих даних розрахунковим способом можна оцінити межу вогнестійкості повнорозмірної конструкції.

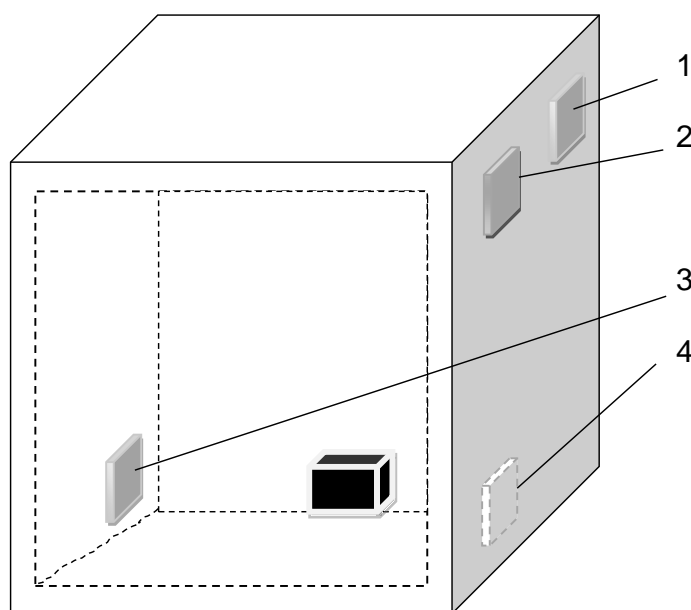


Рисунок 7.7 – Схеми розташування пальників під час проведення експериментальної частини методики: 1 – 4 – умовні номери пальників.

Схеми розміщення конструкцій представлено в параграфі 7.2. Для випробування балки та плити можна встановлювати вертикально. Конструкції перебувають лише під власною вагою (без додаткового механічного

навантаження), тому температура прогріву залежить від теплового потоку, що створюється всередині печі. Його розповсюдження не залежить від положення конструкції, тільки від відстані до пальників та нахилу, що є ідентичними.

Перед початком у протоколі фіксують габаритні розміри зразків для випробувань. Рекомендоване виготовлення трьох однакових зразків в ідентичних умовах для подальшого проведення випробувань і перевірки адекватності отриманих результатів.

У процесі випробування будь-якого типу конструкцій використовують два пальники.

У ході експериментів використовують такі місця розташування пальників (рис. 7.7):

- у разі оцінювання вогнестійкості стін – 1 і 3;
- під час оцінювання вогнестійкості плит – 3 та 4;
- для оцінювання вогнестійкості колон – 2 та 3;
- у ході оцінювання вогнестійкості балок – 3 та 4 за горизонтального (підвішеного) закріплення, 1 та 3 – за вертикального.

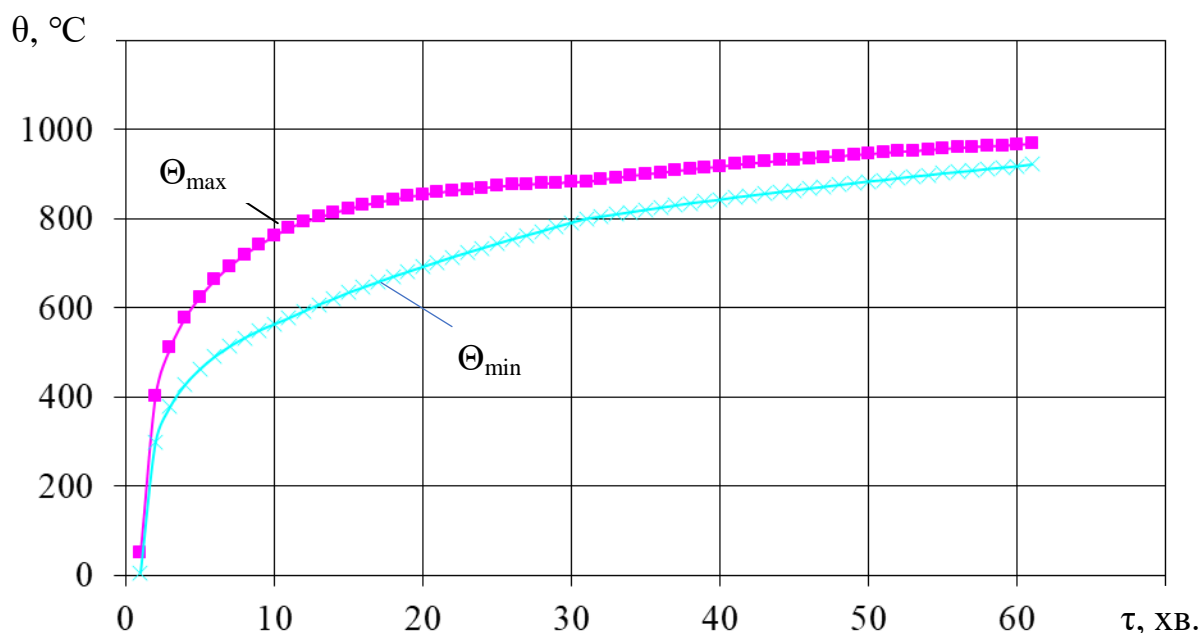


Рисунок 7.8 – Граничні межі лінійної швидкості нагрівання камери вогневої печі під час проведення експериментів [2]

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

У ході випробувань доцільно вести фотофіксацію і відеофіксацію експерименту.

Температурний режим нагрівання камери печі має відповідати стандартному температурному режиму пожежі, що описано у [2]. Це визначають за функційною залежністю (1.1). На рис. 7.8 подано допустимі межі відхилень температурного режиму від стандартного в межах перших 60 хвилин.

Згідно з графіком допустимих температурних меж (рис. 7.8), лінійна швидкість нагрівання камери печі в стандартних межах [2] має найбільші значення різниці максимальної та мінімальної допустимої температури з 5 до 30 хвилини нагрівання. Далі інтенсивність зміни температури в камері та у фрагментах елементів конструкцій знижується. Проте процеси прогріву конструкцій продовжуються, час несучої здатності знижується.

7.6. Оброблення експериментальних даних

Мета експериментів – визначення температури в контрольних точках (рис. 7.6) для подальшого розрахунку температурних полів у досліджуваних конструкціях та проведення розрахунку на міцність.

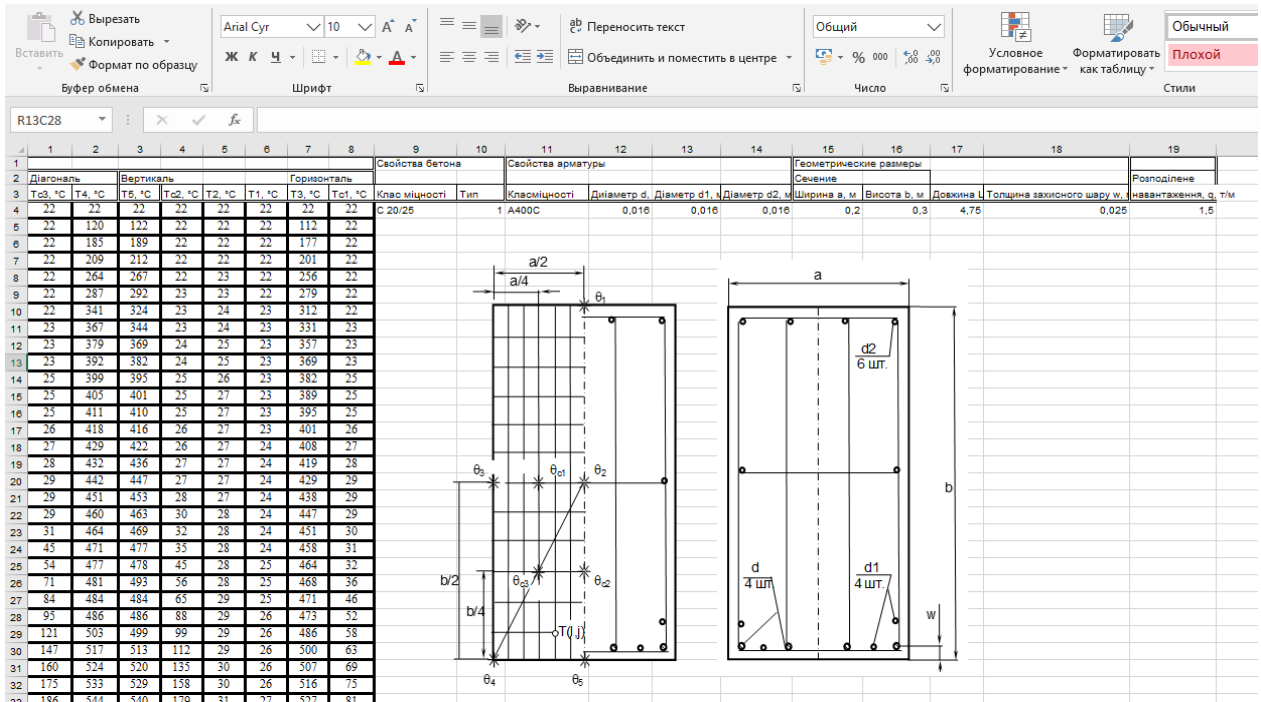
Оформлення таблиці представлено на рис. 7.9.

На рис. 7.9 на прикладі залізобетонної стіни продемонстровано загальний вигляд таблиці вхідних даних.

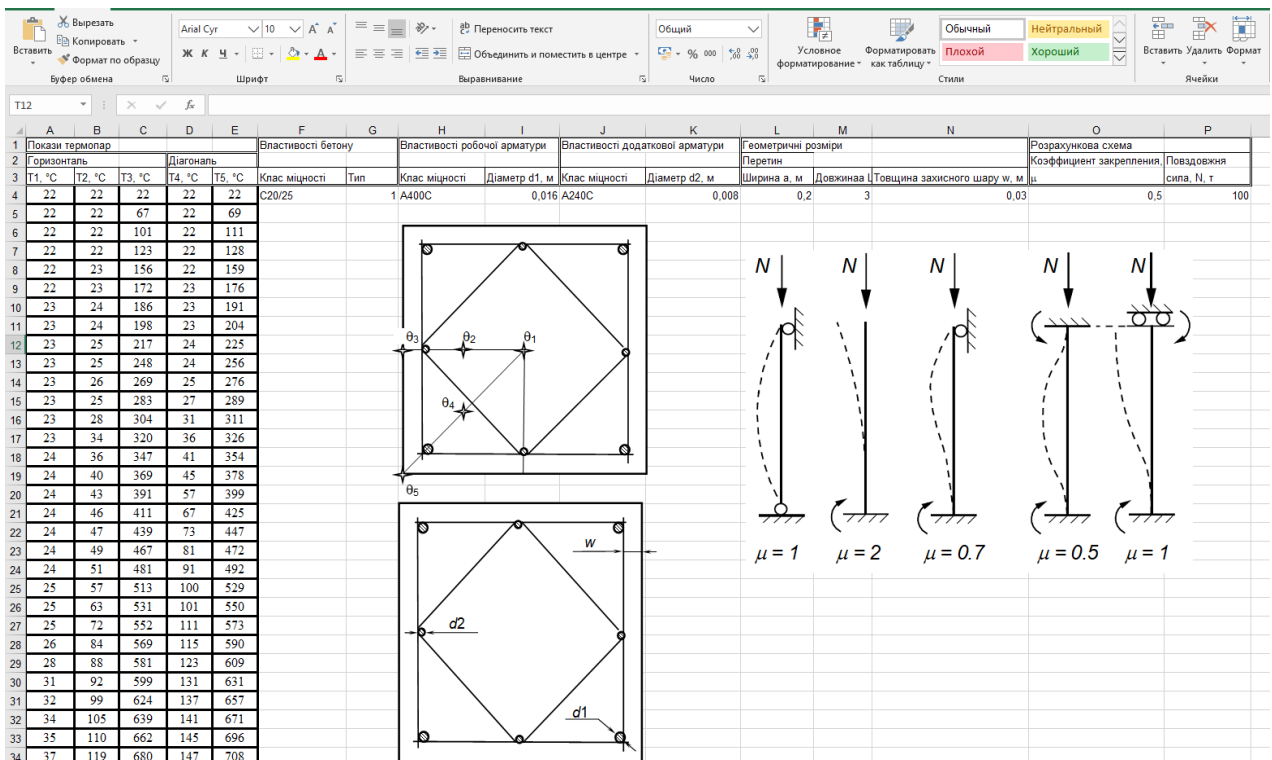
Для оброблення систематизованих даних доцільно використовувати плагін «PLX DAQ» для «Microsoft Excel» (або аналог), що допомагає в реальному часі фіксувати числові значення температури та будувати графіки. Далі потрібно створити таблицю вхідних даних у «Microsoft Excel».

Для кожного виду елементів залізобетонних конструкцій розроблено схему фіксації вхідних даних. У схемі взято до уваги положення конструкції, армування,

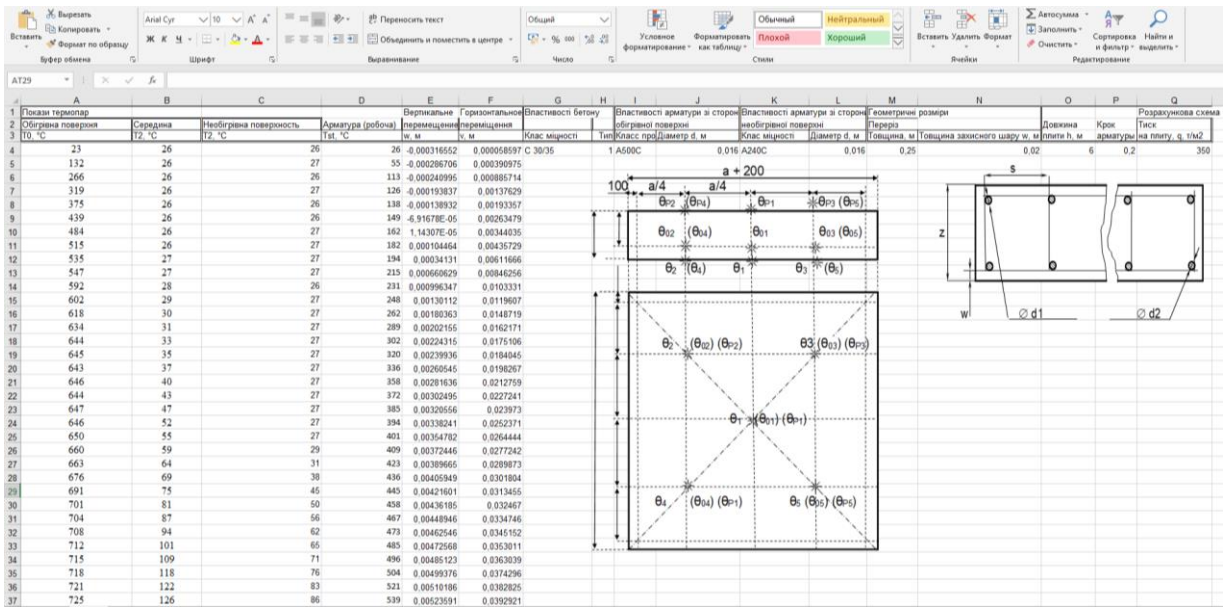
особливості навантаження й роботи конструкції, а також температурні дані експериментальних досліджень.



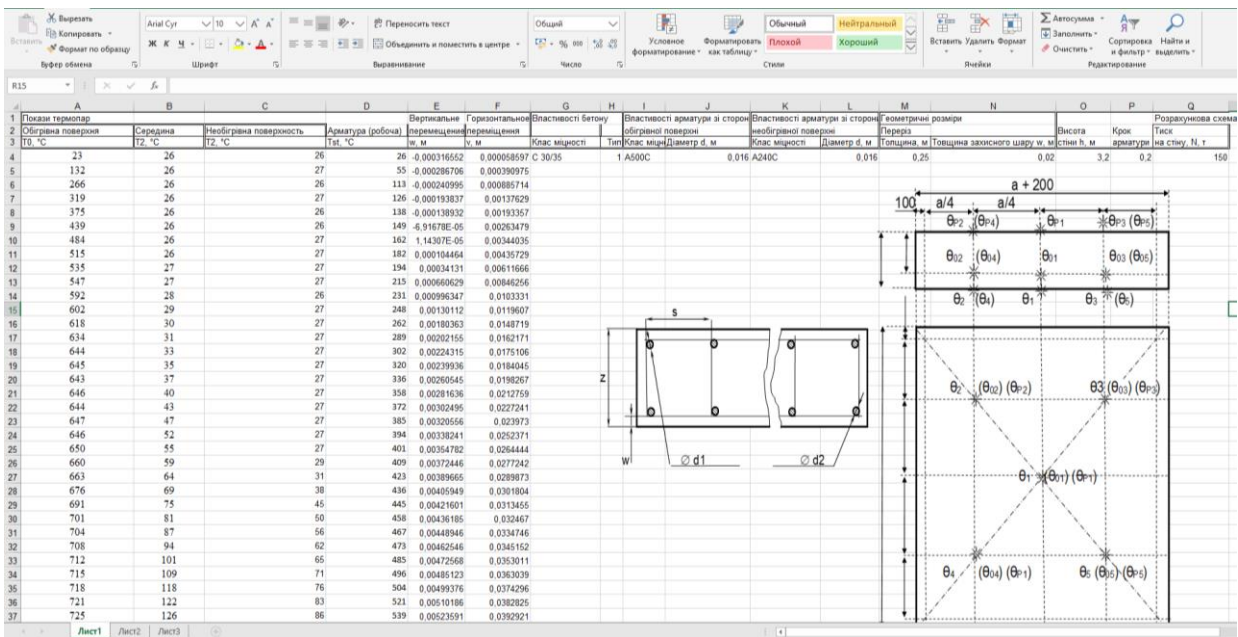
а (балка)



б (колонна)



В (стіна)



Г (плита)

Рисунок 7.9 – Приклад систематизації розрахункових даних для проведення розрахунку на міцність

Необхідно зафіксувати такі дані: температура під час нагрівання на обігрівальній, необігрівальній поверхні, у середній частині та на арматурі з обігрівальної сторони; параметри арматури (діаметр основної і додаткової, клас

міцності, крок); товщина захисного шару бетону. Крім того, необхідно взяти до уваги геометричні розміри й навантаження, що діятимуть на конструкції під час роботи в будівлі. Для різних видів конструкцій уводять дані, притаманні саме їм:

- для стіни – висоту стіни, величину повздовжньої вертикальної сили, товщину стіни;
- для плити – довжину, товщину та тиск на плиту;
- для колони – висоту колони, величину вертикальної повздовжньої сили, параметри перерізу;
- для балки – довжину, геометричні параметри перерізу та тиск на балку.

Для залізобетонних стін і плит доцільно брати до уваги горизонтальне переміщення конструкцій у процесі нагрівання [305–307].

7.7. Алгоритм проведення розрахункової частини та необхідна інформація для оцінювання вогнестійкості

Для розрахунку початкові дані фіксують у розрахунковій програмі. Спеціально для цих цілей систематизовано математичний апарат для кожного з основних видів залізобетонних конструкцій, а потім створено розрахункові програми засобами програмного комплексу «MathCad» [188–190].

Concrete Class	f1	f2	f3
C 8/10	240 10 ⁶	0.75 10 ⁶	1.35 10 ⁶
C 12/15	400 10 ⁶	0.92 10 ⁶	1.85 10 ⁶
C 16/20	500 10 ⁶	1.1 10 ⁶	2.1 10 ⁶
C 20/22	600 10 ⁶	1.35 10 ⁶	2.45 10 ⁶
C 25/28	800 10 ⁶	1.55 10 ⁶	2.75 10 ⁶
C 30/35	1000 10 ⁶	1.75 10 ⁶	3.2 10 ⁶
C 35/40	1200 10 ⁶	1.95 10 ⁶	3.5 10 ⁶
C 40/44	1400 10 ⁶	2.1 10 ⁶	4.5 10 ⁶
C 45/50	1600 10 ⁶	2.25 10 ⁶	5.5 10 ⁶
C 50/55	1800 10 ⁶	2.45 10 ⁶	6.5 10 ⁶
C 55/60	2000 10 ⁶	2.6 10 ⁶	7.5 10 ⁶
C 60/66	2200 10 ⁶	2.75 10 ⁶	8.5 10 ⁶
C 70/77	2800 10 ⁶	2.95 10 ⁶	10 10 ⁶
C 80/88	3200 10 ⁶	3.2 10 ⁶	11.5 10 ⁶
C 90/105	3600 10 ⁶	3.5 10 ⁶	13.5 10 ⁶
C 100/115	4000 10 ⁶	4.5 10 ⁶	15 10 ⁶
otherwise	400 10 ⁶	1.35 10 ⁶	2.1 10 ⁶

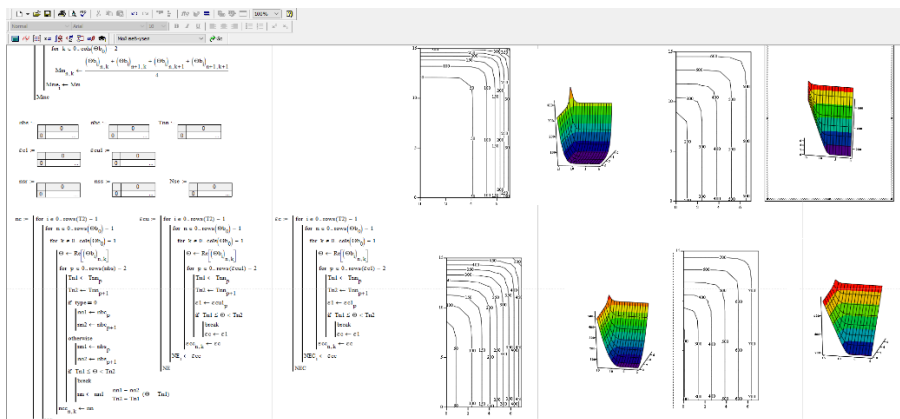
Рисунок 7.10 – Сторінка завантаження систематизованих початкових даних до комплексу з проведення розрахункових процедур

Згідно з рис. 7.10, після завантаження систематизованих табличних даних проводять розрахунок. Результатами є час настання межі вогнестійкості або висновок щодо його недосягнення за розрахунковий час. У цьому разі отримують відсоток запасу міцності конструкції.

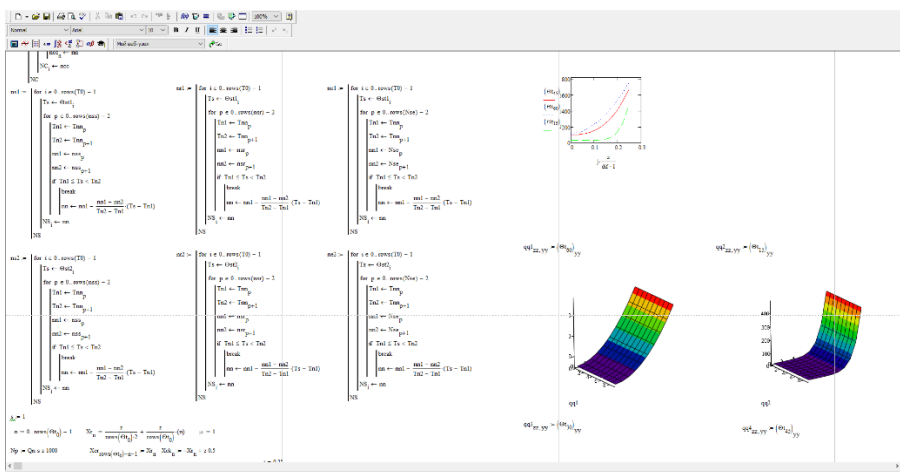
Найдоцільніше вводити дані температур по часу не менше ніж мінімально відповідає запланованій межі вогнестійкості або перевищує її.

Для розрахунку кожного виду конструкцій застосовують окремий математичний апарат. Детально його описано для кожного з виду елементів у розділі 6. До уваги беруть вид обігріву поверхні, габаритні розміри конструкцій та положення їх у просторі, а також власну вагу, зовнішнє навантаження [225; 309; 327–328].

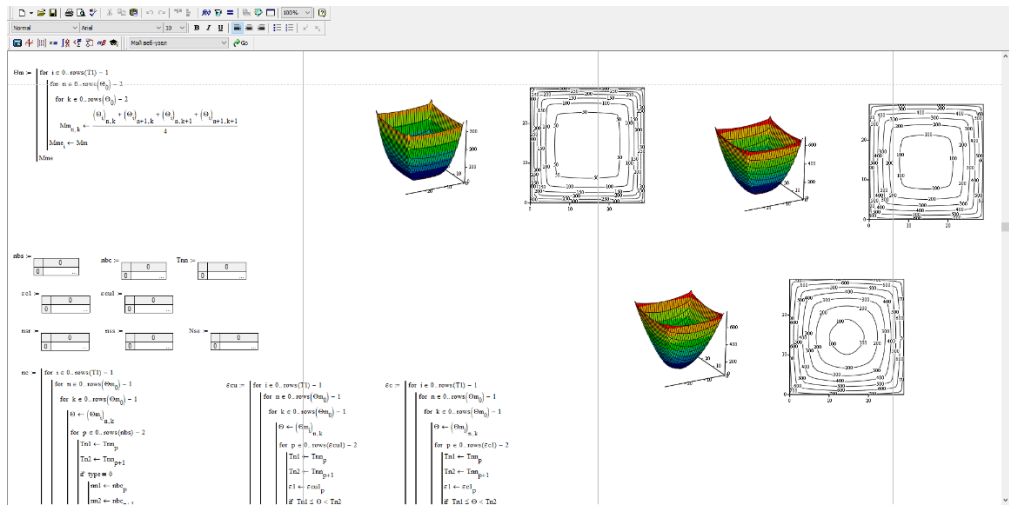
У процесі розрахунку дані варто візуалізувати. На рис. 7.11 продемонстровано процес обчислення в програмному комплексі.



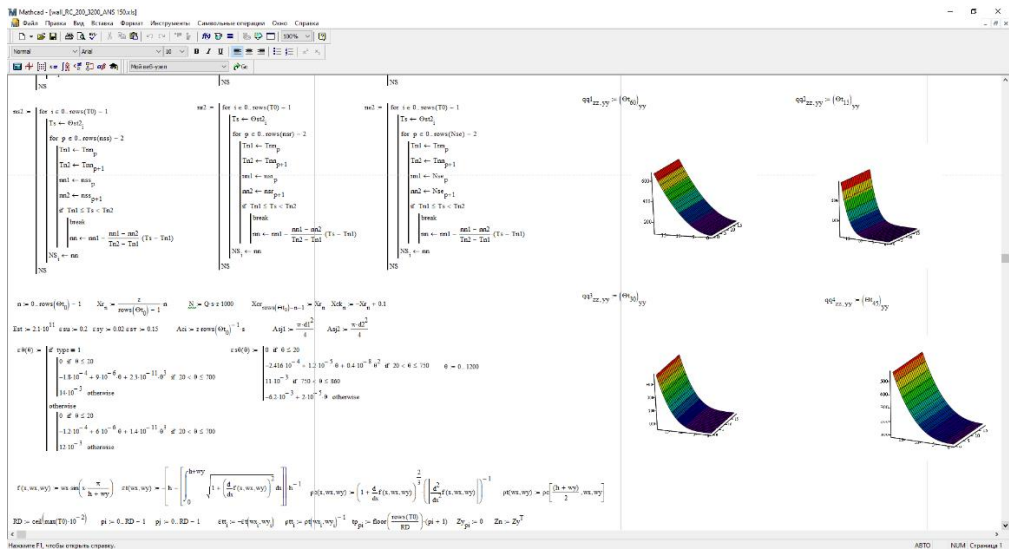
а (балка)



б (плита)



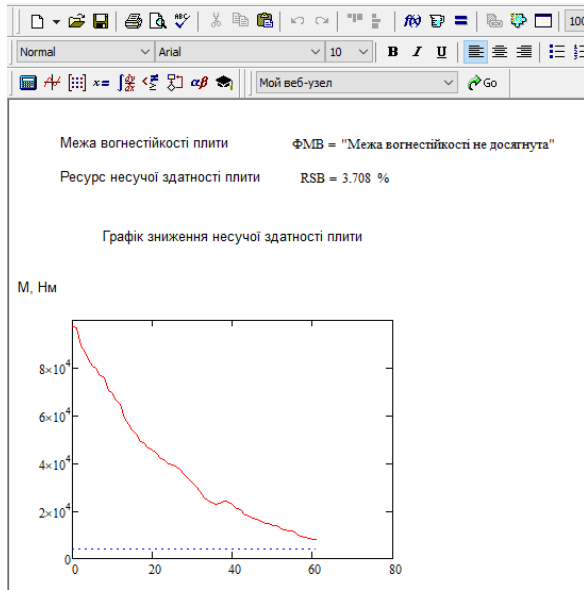
В (КОЛОНА)



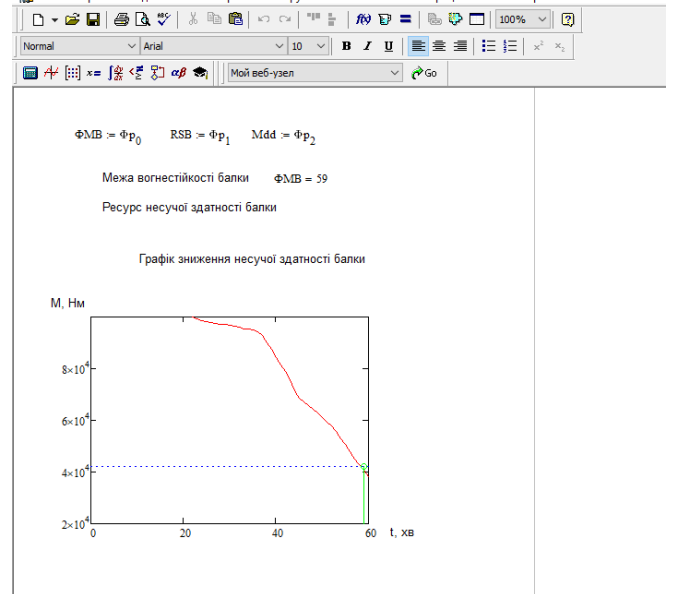
Г (СТІНА)

Рисунок 7.11 – Сторінка завантаження систематизованих початкових даних до комплексу з проведення розрахункових процедур

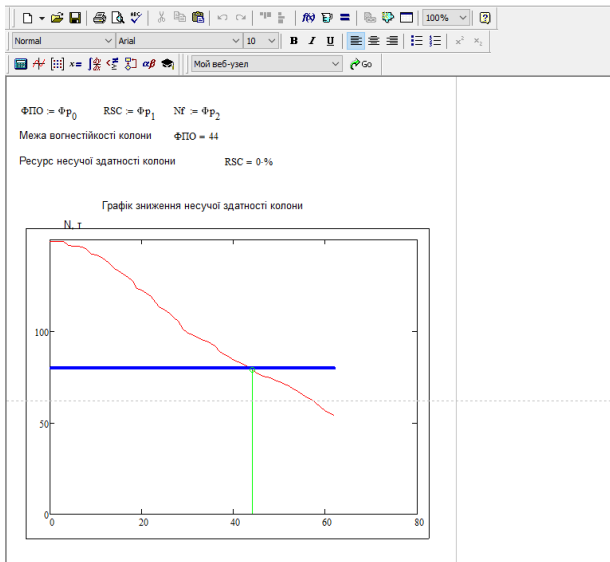
Рис. 7.11 доводить, що графіки прогріву представлені у двох виглядах. Можливі й інші варіанти, які дають змогу побачити та проаналізувати, що саме і на якій хвилині відбувається.



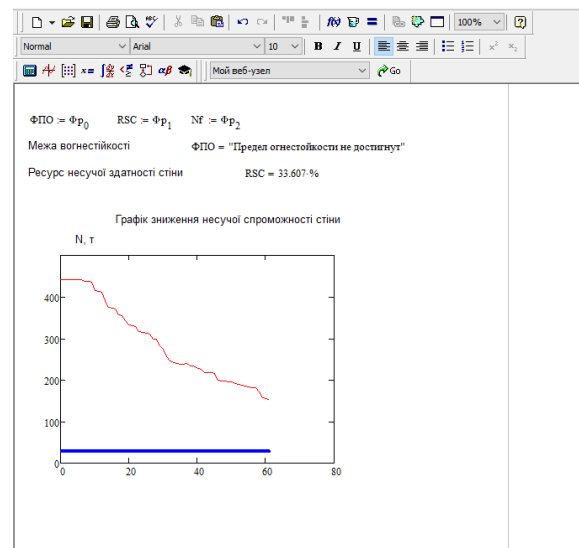
а (балка)



б (плита)



в (колона)



г (стіна)

Рисунок 7.12 – Сторінка виведення кінцевих результатів відповідно до виконаних розрахункових процедур

На рис. 7.12 продемонстровано приклад відображення кінцевого результату. Для плити, яка слугувала прикладом, межа вогнестійкості не досягнута за 60 хвилин, а ресурс несучої здатності становив майже 4 %.

7.8. Перевірка адекватності та аналіз отриманих результатів

Після проведення всіх процедур, відповідно до експериментально-розрахункового методу, можливо отримати два варіанти результатів [328]:

– у першому випадку межі вогнестійкості не досягнуто протягом необхідного часу; так підтверджується ступінь вогнестійкості, що запроєктовано; це трапляється тоді, коли час експериментальної частини t , отже, розрахунку був не меншим за необхідний;

– у другому випадку отримують значення межі вогнестійкості у хвилинах; тоді можливо ухвалити рішення щодо зміни характеристик матеріалів та / або їхніх параметрів.

У процесі розрахунку вогнестійкості плит і стін необхідно зважати на втрату цілісності й теплоізолювальної спроможності, оскільки відбувається односторонній прогрів цих конструкцій. Зазначені показники беруть до уваги як на етапі експериментальних досліджень, так і в ході розрахунків. Температура на необігрівальній поверхні плит та стін не повинна перевищувати $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ у середньому та / або $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ у будь-якій точці на поверхні, а цілісність має бути не порушена. Якщо з'являються наскрізні тріщини чи температура перевищує параметри, необхідно вважати саме цей час межею вогнестійкості стін або плит.

В іншому випадку варто звернутися до значення несучої здатності, що притаманне також балкам і колонам. Відповідно до розробленої системи, найбільш доцільно перевіряти адекватність експериментальної частини. Для цього необхідно й достатньо встановити контрольний датчик в будь-якому місці всередині конструкції (бажано ближче до середньої частини), записати глибину занурення та показники термометри, а потім порівняти з даними інтерполяції в певній точці. Докладно це описано в параграфах 6.1.1, 6.2.1, 6.3.1 та 6.4.1. Оформляти результати доцільно у вигляді звіту.

Висновки до розділу 7

У розділі узагальнено отримані наукові результати. Створено систему оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій, яка зважає на спільну дію механічного й теплового навантаження, що сприяє розв'язанню проблеми гарантування нормативного часу вогнестійкості під впливом температурного режиму пожежі.

1. Науково обґрунтовано метод оцінювання вогнестійкості окремо для кожного виду конструкцій (балки, колони, плити, стіни). Зазначено, що спочатку проводять вогневі випробування фрагмента в печі розміром 1*1 м, потім за точковими значеннями температури розраховують температурні поля. З огляду на ці поля, для кожної конструкції розроблено алгоритм, за яким окремо визначають три показники вогнестійкості (несуча, теплоізоляційна, цілісність). Найменший буде межею вогнестійкості.

2. Систематизовані методи є ефективнішими за випробування на вогнестійкість, оскільки вони менш трудомісткі, більш екологічні та точніші в багатьох випадках. За допомогою таких методів можна проаналізувати навантаження (і згинальний момент) у процесі математичних розрахунків. Також у математичні моделі закладають реальний розмір несучої залізобетонної конструкції, що не обмежений габаритами випробувальної установки.

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

4. Описано концепт створення малогабаритної вогневої випробувальної установки й підсумовано, що найменш можливим розміром камери печі має бути 1×1×1 м, оскільки саме такі габарити забезпечують відстань у 0,8 м від факела полум'я до досліджуваних конструкцій. Це зменшує похибку щодо замірів

температури в камері печі й на обігрівній поверхні аналізованих фрагментів елементів несучих конструкцій.

5. Визначено мінімальну кількість та описано схеми розташування термопар під час вогневих випробувань фрагментів елементів несучих залізобетонних конструкцій. Для балки доцільно використовувати 8 термопар, що розташовані в її середній частині: на обігрівальній поверхні, арматурі, у центрі перерізу та необігрівальній стороні; для колони – 6 термопар за схожою схемою, а для плити й стіни необхідно щонайменше 12 термопар, частину з яких використовують для контролю втрати теплоізоляційної спроможності. Для контролю температури в камері печі достатньо трьох термопар. Схеми розташування термопар подано в роботі.

ВИСНОВКИ

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

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

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

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

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

Обґрунтовано параметри камери вогневої печі й розміщення її ключових елементів. Методом комп'ютерного моделювання доведено, що для універсальності є доцільним створення камеру печі кубічної форми з внутрішніми розмірами $1 \times 1 \times 1$ м, так як відтворюваність результатів не порушується. Достатньо двох газових пальників зі змінним розміщенням для мінімізації дисперсії температур по обігрівальних поверхнях фрагментів залізобетонних конструкцій.

4. На основі отриманих даних створено ескіз і побудовано реальну установку для проведення експериментальної частини загальної системи оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій під впливом стандартного температурного режиму пожежі, що здатна забезпечити високий ступінь відтворюваності експериментальних даних.

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

6. Підтверджено гіпотезу стосовно відтворюваності й достовірності результатів за допомогою перевірки адекватності експериментальних даних,

обчислення критеріїв адекватності та визначення відносної похибки між отриманими результатами. Збіжність отриманих даних становить для плити 4,0 %; для стіни – 3,6 %; для колони – 4,0 %; для балки – 7,9 %.

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

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

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В 1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. [Чинний від 2017-06-01]. Київ : *Мінрегіон України*, 2017. 35 с.
2. ДСТУ Б В.1.1-4-98*. Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. *Загальні вимоги*.
3. Новак С. В., Григор'ян Б. Б., Нефедченко Л. М., Абрамов О. О. Оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій та виробів. *Методи випробувань: навч. посіб.* Черкаси: АПБ, 2011. 124 с.
4. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1: 2010. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила та правила для будівель (*EN 1992-1-1: 2004, IDT*).
5. Сідней С. О., Нуянзін О. М., Тищенко О. М. та ін. Дослідження прогріву залізобетонної стіни за умов нерівномірного теплового впливу при її випробуваннях на вогнестійкість. *Збірник наукових праць «Пожежна безпека: теорія і практика»*. Черкаси, 2016. № 21. С. 16–23.
6. Половко А. П. Методика визначення експериментальним способом межі вогнестійкості за ознакою втрати теплоізолювальної здатності багатошарових конструкцій. *Lviv Polytechnic National University Institutional Repository*. Львів, 2012. С. 164–169.
7. Нуянзін О. М., Поздєєв С. В., Сідней С. О., Кришталь М. А. Дослідження впливу дисперсії температур по обігрівальній поверхні несучих стін на значення їхньої межі вогнестійкості. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. Черкаси, 2017. № 1. С. 89–100.
8. Борсук О. В., Нуянзін О. М., Кришталь В. М., Ведула С. А., Горovenko М. М. Дослідження межі вогнестійкості сталеві балки за умови втрати цілісності вогнезахисного покриття. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. Черкаси, 2020. № 4 (2). С. 5–15.
9. Поздєєв С. В., Нуянзін О. М., Сідней С. О., Новгородченко А. Ю., Борсук О. В. Дослідження нагрівання сталевих двотаврових стержнів із

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

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

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

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

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

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

15. Шналь Т. М. Вогнестійкість та вогнезахист металевих конструкцій: *навч. посібник*. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. 176 с.

16. Осипенко В. І., Поздєєв С. В., Тищенко І. Ю. Будівельні матеріали та їх поведінка при дії високих температур: *Навч. посіб.* Черкаси, 2012. 202 с.

17. Васильченко О. В., Квітковський Ю. В., Луценко Ю. В., Миргород О. В. Безпека експлуатації будівель і споруд та їх поведінка в умовах надзвичайних ситуацій: *Навч. посібник*. Харків: НУЦЗУ, 2010. 372 с.

18. Беліков А. С., Маладика І. Г., Борсук О. В. Підвищення вогнестійкості металевих конструкцій як шлях забезпечення вогнезахисту будівель. *Збірник наукових праць «Пожежна безпека: теорія і практика»*. Черкаси, 2014. № 18. С. 38-42.

19. Пушкаренко А. С., Василенко О. В., Квітковський Ю. В., Луценко Ю. В., Миргород О. В. Вогнезахисне оброблення будівельних матеріалів і конструкцій: *Навч посіб.* Харків: НУЦЗУ, КП «Міська друкарня», 2011. 176 с.

20. Лемешев М. С., Березюк О. В. Будівельні матеріали для захисту від електромагнітного випромінювання. Суми: *Вісник Сумського національного аграрного університету*, 2015. № 10. С. 57-62.

21. Григорян Б.Б. Огнестойкость сжатых железобетонных элементов при температурных режимах близких к реальным: дис. ... кандидата техн. наук : 05.23.01. Борис Бахшиевич Григорян. Харків, 2001. 168 с.

22. Немчинов Ю. І. и др. Дослідження вогнестійкості будівельних конструкцій. *Наука та будівництво*, 2014. №. 2. С. 11–16.

23. Демчина Б. Г. Вогнестійкість одно-і багат шарових просторових конструкцій житлових та громадських будівель. *Дис. Доктора техн. наук.* Львів, 2003.

24. Демчина Б.Г., Пелех А.Б., Олексин Г.М., Сурмай М.І. Поведінка дощатоклеєних колон за місцевого впливу температури. *Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка"*. Львів, 2009. № 655. С. 71–74.

25. Пелех А.Б., Демчина Б. Г., Шналь Т. М., Була С. С., Крочак О. В. Натурні випробування конструкції дерев'яної рами на вогнестійкість в умовах реальної пожежі. *Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка"*. Львів, 2008. № 627. С. 167–171.

26. Конституція України від 28 червня 1996 р. *Відомості Верховної Ради України*. 1996. №30. ст.141.

27. НАПБ А.01.001-2014 Правила пожежної безпеки в Україні.

28. ДСТУ 2272:2006 Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять.

29. ДБН В.2.6-98:2009 Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. *Основні положення.*

30. ДБН В.1.2-7-2008 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. *Основні вимоги до будівель і споруд пожежна безпека.*

31. Захист від пожежі. Балки. Метод випробування на вогнестійкість (EN 1365-3:1999, NEQ) ДСТУ Б В.1.1-13:2007 [Чинні від 01.01.2008] Мінрегіонрозвитку та будівництва України від 22.06.2007. 6 с. *(Національний стандарт України).*

32. Несучі стіни. Метод випробування на вогнестійкість (EN 1365-1:1999, MOD) ДСТУ Б В.1.1-19:2007 [Чинні від 01.01.2008] Мінрегіонрозвитку та будівництва України від 22.06.2007. 27 с. *(Національний стандарт України).*

33. Захист від пожежі. Перекриття та покриття. Метод випробування на вогнестійкість (EN 1365-2:1999, NEQ) ДСТУ Б В.1.1-20:2008. Чинні від 01.01.2008] Мінрегіонрозвитку та будівництва України від 22.06.2007. 27 с. *(Національний стандарт України).*

34. Захист від пожежі. Колони. Метод випробування на вогнестійкість (EN 1365-4:1999, NEQ) ДСТУ Б В.1.1-14:2007 [Чинні від 01.01.2008] Мінрегіонрозвитку та будівництва України від 22.06.2007. 6 с. *(Національний стандарт України).*

35. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (*EN 1991-1-2:2002, IDT*).

36. Жартовський В.М., Цапко Ю.В., Соколенко К.І., Ліхньовський Р.В. Дослідження з підвищення ефективності застосування вогнезахищеної деревини. *Науковий вісник УкрНДПБ*, 2006. № 1 (13). С. 55–58.

37. Новак С.В., Нефедченко Л.М., Абрамов О.О. Методи випробувань будівельних конструкцій та виробів на вогнестійкість. Київ: *Пожінформтехніка*, 2010. 132 с.

38. Будинки і споруди. Жиллові будинки. Основні положення. ДБН В.2.2-15-2005. [Чинні від 01.01.2006] Держбуд України від 18.05.2005 № 80. 45 с. *(Державні будівельні норми України).*

39. Захарченко П. В., Гавриш О. М., Карпенко О. О., Петухов О. М. Технологія та товарознавство систем сухого будівництва: вогнезахист будівельних конструкцій. *Навч. посіб. КНУБА*. Київ: «СПД Павленко», 2012. 392 с.

40. Полупан В. А. и др. Вогнестійкість будівельних конструкцій як елемент системи пожежної безпеки: матеріали *The I International Scientific and Practical Conference «Current trends in the development of modern scientific thought»*. Haifa, Israel. – 2022. С. 495–497.

41. Nuianzin O., Pozdieiev S., Hora V., Shvydenko A., Samchenko T. Cable tunnels temperature fire mode experimental study. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Т. 3. Р. 21–28.

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

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

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

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

46. Семьонова Х. О., Хімичева Г. І. Загальні вимоги до метрологічного забезпечення сертифікаційних випробувань. *Наукові розробки молоді на сучасному етапі. КНУТД*, 2016. С. 13–14.

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

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

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

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

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

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

53. Моделювання пожеж у кабельних тунелях/ Нуянзін О. М., Поздєєв С. В., Кришталь М. А. [та ін.]. Черкаси: *Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України*, 2020. 94 с.

54. Кусковець С. Л., Шаталов О. С., Турченко В. О. Основи теорії горіння та вибуху. Львів, 2012. 202 с.

55. Колієнко В. А., Шеліманова О. В. Особливості спалювання горючих газів із змінними характеристиками процесу горіння. Київ, 2015. С. 69-75.

56. Рябінін І. М. Зворотна тяга як дефлаграційне горіння. *Збірник матеріалів міжнародної науково-практичної конференції*. Дніпро, 2014. С. 263.

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

58. Нуянзін, О. М., Костенко В. К., Зав'ялов Г. В. [та ін.]. Захист рятувальників від впливу тепла. Черкаси: *ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України*, 2017. 120 с.

59. Нуянзін, О. М., Кришталь М. А., Кришталь Д. О., Тищенко Є. О. Основи термодинаміки і теплопередачі для рятувальників. Черкаси: *ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України*, 2017. 166 с.

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

61. Кузик А. Д., Семерак М. М., Сидорчук Н. С. Математичне моделювання поширення тепла в елементах будівельних конструкцій під час пожежі. Львів, 2010. С. 75–80.

62. Нуянзін О. М., Костенко В. К., Костенко Т. В., Покалюк В. М. та інші, всього 5 осіб. Пінний охолоджуючий пристрій теплозахисного костюма. *Патент України на корисну модель № 114109, опублікований 27.02.2017 року*, Бюлетень № 4.

63. Нуянзін О. М., Костенко В. К., Костенко Т. В., Покалюк В. М. та інші, всього 5 осіб. Охолоджуючий пристрій теплозахисного костюма. *Патент України на корисну модель № 115193 опублікований 10.04.2017 року*, Бюлетень № 7.

64. Круковський П. Г., Новак С. В. Аналіз існуючих методів оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій. *Пожезна безпека: теорія і практика*. Київ, 2013. №. 14. С. 69–72.

65. Фомін С. Л., Стельмах О. А., Джафар Шакер Шахін. Вогнестійкість центрально стислих залізобетонних елементів. *Зб. пожежної безпеки. Організаційно-технічне забезпечення*. Харків: ХІПБ МВС України, 1996. С. 78–81.

66. Дмитренко Є. та ін. Оцінка вогнестійкості залізобетонних колон уточненими розрахунковими методами. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. Київ, 2021. №. 8. С. 82–96.

67. Фомін С. Л. Робота залізобетонних конструкцій при впливі кліматичного, технологічного і пожежного середовища : *автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня д-ра техн. наук : 21.06.02 «Пожезна безпека»*; Харківська державна академія залізничного транспорту. Харків, 1997. 38 с.

68. Аскарова А. С. та ін. Дослідження конвективного тепломасопереносу в турбулентних течіях за наявності горіння. *Наукові вісті Національного технічного університету України Київський політехнічний інститут*. Київ, 2012. №. 2. С. 16–23.

69. Терлецька І. М., Черномаз Н. Ю. Підвищення вогнестійкості залізобетонних конструкцій. *Матеріали VIII науково-технічної конференції „Інформаційні моделі, системи та технології “*. Київ, 2020. С. 197.

70. Kluz T. The fire resistance of prestressed concrete: *concrete and constructional Engineering*, 1959. № 7. P. 231–241.

71. Бабич Є. М., Поляновська О. Є. Математична модель напруження зчеплення арматури з бетоном. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2012. №. 47. С. 28–33.

72. Крейч М. М. Вплив товщини захисного шару на напруження зчеплення арматури з високоміцним бетоном. *Студентський вісник НУВГП*. Рівне, 2021. №. 1 (15). С. 7–9.

73. Руденко Д. В. Дослідження напруженого стану модифікованого монолітного бетону. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського*

національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Дніпро, 2016. №. 6. С. 166–174.

74. Lie T. T. Processus du development et estimation de l'importance d'une incendie. «Rev. techn.», 1973. № 133. P. 30–36.

75. Petterson O. S-E Magnusson, Lorgen Tohr-Fire engineering Design of Stee. *Structures, are SBI*, 1976. P. 64–72.

76. Lie T. T. Characteristic temperature curves for various fire severities. «*Fire Tachnol*», 1974. № 4. P. 315–326.

77. Rubini P. SOFIE – Simulation of Fires in Enclosures, V 3.0 *Users guide*, *School of Mechanical Engineering*, Granfield University (UK), 2000.

78. Gerhadt H. Design Method of Smoke and Heat exhaust Systems in construction Works. *Materiały V Międzynarodowy Konferencji «Bezpieczeństwo pożarowe budowli»*. 2005. P. 127–140.

79. Sundstrom B. Test Methods and Their use for Fire Safety Engineering / B. Sundstrom. *Materiały V Międzynarodowy Konferencji «Bezpieczeństwo pożarowe budowli»*. 2005. P. 141–150.

80. Krukovsky P. Fire Safety Analysis for new Safe confinement's Building Constructions of Chernobyl NPP. *Materiały V Międzynarodowy Konferencji «Bezpieczeństwo pożarowe budowli»*. 2005. P. 223–227.

81. Law Margaret. Predication of fire resistance. «*Fire-Resistance Requirements Build - New Approach. Proc. Symp.*, London, 1971" London, 1973. P. 15–29.

82. Томіленко М. А. Вплив законодавства в галузі архітектури та будівництва на протипожежний стан населених пунктів Наддніпрянської України в ХІХ. Черкаси, 2019. С. 123–125.

83. Полупан В. А. та ін. Вогнестійкість будівельних конструкцій як елемент системи пожежної безпеки: матеріали *The I International Scientific and Practical Conference «Current trends in the development of modern scientific thought»*. Haifa, Israel, 2022. С. 495–497.

84. Захарченко П. В., Гавриш О. М., Калугіна О. М. Сучасні наукові розробки в протипожежному облицюванні на основі сухого будівництва. *Будівельні матеріали та вироби*. Київ, 2011. №. 5. С. 19–20.

85. Ніжник В. В. Підходи щодо визначення протипожежних відстаней між будинками та спорудами. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. Київ, 2019. №. 53. С. 215–226.

86. Поздєєв С.В., Словінський В.К., Щіпець С.Д., Омельченко А.М. Визначення температурних полів у перерізі залізобетонної колони при її випробуванні на вогнестійкість. *Пожежна безпека : теорія і практика : зб. наук. праць*. Черкаси: АПБ, 2013. № 15. С. 130–137.

87. Сідней С. О. Підвищення достовірності результатів вогневих випробувань при оцінюванні межі вогнестійкості несучих стін. *дис. кандидата техн. наук : 21.06.02*. Сідней Станіслав Олександрович. Львів, 2015 138 с.

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

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

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

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

92. Захист від пожежі. Споруди та фрагменти будівель. Метод натурних вогневих випробувань. Загальні вимоги. ДСТУ Б В.1.1-18:2007. [Чинний від 2007-10-26.] К. : Мінрегіонбуд України, 2007. 9 с. (*Національний стандарт України*).

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

94. ДСТУ Б В.2.6-7-95 Конструкції будинків і споруд. Вироби будівельні бетонні та залізобетонні збірні. Методи випробувань навантаженням. *Правила оцінки міцності, жорсткості та тріщиностійкості*.

95. ДСТУ Б В.2.6-10-96 Конструкції будинків та споруд. Конструкції сталеві будівельні. *Методи випробування навантаженням*.

96. ДСТУ EN 1363-1:202_ (EN 60584-1, IDT) "Випробування на вогнестійкість. Частина 1. Загальні вимоги",

97. ДСТУ EN 1363-2:202_ (EN 1363-2:1999, IDT) "Випробування на вогнестійкість. Частина 2. Альтернативні і додаткові процедури"

98. ДСТУ ENV 1363-3:202_ (ENV 1363-3:1998, IDT) "Випробування на вогнестійкість. Частина 3. Верифікація параметрів печі".

99. Віткін Л., Ігнаткін В. Метрологічна надійність засобів вимірювальної техніки. Київ, 2008. 144 с.

100. Harmathy T. Z. The fire resistance test and its relation to real world fires. *Fire and Materials*. 1981. Vol. 5. № 3. P. 59–65.

101. Фомін С. Л. та ін. Основи розрахунку вогнестійкості залізобетонних будівель в статичній та динамічній постановках. *Збірник наукових праць «Науковий вісник будівництва»*. Харків: ХНУБА, 2021. т. 104. № 2. С. 221–226.

102. Куліченко А. Я., Мілянч А. Р. Дослідження пружнопластичного руйнування методом кінцевих елементів. *Науковий вісник НЛТУ України*. Львів, 2012. Т. 22. №. 4. С. 347–356.

103. EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2 : Design of concrete structures – Part 1-2 : *General rules – Structural fire design*, Brussels 2004.

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

105. Перегін А. Дослідження впливу конфігурації та параметрів вогневих печей на умови нагрівання несучих стін за стандартним температурним режимом пожежі. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. Черкаси, 2022. Т. 6. №. 1. С. 85–94.

106. Перегін А., Нуянзін О. Етапи створення прототипу вогневої установки для визначення температурних розподілів малогабаритних фрагментів залізобетонних конструкцій. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2021. Т. 5. №. 2. С. 75–82.

107. Некора О.В. Розрахунково-експериментальний метод визначення вогнестійкості стиснутих елементів залізобетонних будівельних конструкцій: *дис. кандидата техн. наук : 21.06.02*. Некора Ольга Валеріївна. Черкаси, 2008.–147 с.

108. Поздєєв С. В., Некора О. В., Поздєєв А. В. Методика визначення режимів нагрівання бетонних зразків, що моделюють стан елементів будівельних конструкцій під час пожежі. *Проблеми пожежної безпеки*. Харків : АГЗУ, 2006. Вип. 19. С. 111–116.

109. Поклонський В. Г. та ін. Розрахункові методи оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій за Єврокодами. *Будівельні конструкції*. Київ, 2016. №. 83 (2). С. 380–389.

110. Некора О. В. Определение несущей способности железобетонной колонны при пожаре расчетно-экспериментальным методом. *Вісник ЧДТУ*. 2006. №. 4. С. 15–20.

111. Бакін П. І. та ін. Визначення вогнестійкості будівельних конструкцій розрахунковими методами відповідно до стандартів, що впроваджують Єврокоди. *Світ геотехніки*. 2011. №. 1. С. 12–15.

112. Поздєєв С. В., Словінський В. К., Щіпець С. Д. Експериментально-розрахунковий метод оцінки вогнестійкості залізобетонних колон на основі їх

вогневих випробувань. *Пожжежна безпека: теорія і практика*. Черкаси, 2013. № 14. С. 88–93.

113. Чорний О. П., Титюк В. К., Істоміна Н. М. та ін. Математичні методи моделювання: навчальний посібник, під заг. ред. Чорного О. П. Кременчук: ПП Щербатих О. В., 2016. 232 с.

114. Petryk M. R. et al. Високопродуктивні обчислювальні методи і технології моделювання нанопористих систем зі зворотними зв'язками для адсорбційного очищення газів. *Bulletin National University of Water and Environmental Engineering*. 2019. Т. 3. №. 87. С. 66–83.

115. Жолткевич Г. Г. Спеціальність 01.05.02. Математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки) : дис. Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, 2021.

116. Amsden A. A., Hirt C. W. A simple scheme for generating general curvilinear grids. *J. Comp. Phys*. 1973. 11. № 3. P. 348–369.

117. Bangerth W., Klie H., Matossian V. An automatic reservoir framework for the stochastic optimization of well placement. *Center for Subsurface Modeling, The University of Texas at Austin*, 2006. P. 255–269.

118. Barfield W. D. Numerical method for generating orthogonal curvilinear meshes. *J. Comp. Phys*. 1970. 5, № 1. P. 23–33.

119. Bittencourt A. C., Home R. N. Reservoir development and design optimization. *SPE 38895*, 1997. P. 14.

120. Bozhenko B., Chernukha O. Advective diffusion of admixture in a medium with traps. *Zeszyty Naukowe. Politechnika Opolska. Matymatyka*, 2001. – Z.17, №275. – P. 5–15.

121. Buckley S., Leverett M. C. Mechanism of fluid displacement in sands. *Trans. AIME*, 1942. V. 146. P. 107–115.

122. Carlson M. Practical Reservoir Simulation. *PennWell*, 2003. 540 p.

123. Currie I. G. Fundamental Mechanics of Fluids. 3rd edition. *Marcel Dekker, Inc.*, New. York. 2003. 525 p.

124. Darcy H. Les fontains publiques de la ville de Dijon. Paris, 1856. 647 p.

125. Das D. B. Hassanizadeh S. M. Upscaling Multiphase Flow in Porous Media From Pore to Core and Beyond. *Springer*. 2005. 257 p.
126. Dilts G. A. Moving-least-squares-particle hydrodynamics ii: conservation and boundaries. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2000. 48(10). P. 1503–1524.
127. Dupuit J. Etudes theoretiques et pratiques sur le mouvement des eaux. Paris, 1863. 422 p.
128. Сабірзянов Т. Г. Метод точного розрахунку константи рівноваги складної хімічної реакції. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2011. №. 24 (2). С. 54–59.
129. Axler S. Linear algebra done right. *Springer Science & Business Media*, 1997.
130. Белятинський А., Першаков В. Розвиток перевірки точних методів розрахунку конструкцій. *Проблеми розвитку міського середовища*. 2013. №. 10. С. 15–23.
131. Childs L. N., Childs L. N. The chinese remainder theorem. *A Concrete Introduction to Higher Algebra*. 1995. С. 194–207.
132. Childs L. N. (ed.). *A concrete introduction to higher algebra*. New York, NY: *Springer New York*, 2009.
133. Grillet P. A. Abstract algebra. *Springer Science & Business Media*, 2007. – Т. 242.
134. King, R. Bruce (2009), *Beyond the Quartic Equation*, Springer Science & Business Media Mac Lane S., Birkhoff G. *Algebra*. *American Mathematical Soc.*, 1999. Т. 330.
135. Shafarevich I. R., Everett W. B. *Discourses on algebra*. *Springer*, 2003.
136. Поздєєв С.В. Розвиток наукових засад визначення меж вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій: дис. ... докт. техн. наук : 21.06.02 / Поздєєв Сергій Валерійович. Черкаси, 2012. 360 с.

137. Пурденко Р. Р. та ін. Моделювання оцінювання вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій. Харків, 2023. С. 38.

138. Беліков А. та ін. Удосконалений метод випробувань залізобетонних колон на вогнестійкість // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. Дніпро, 2014. №. 9. С. 21–28.

139. Миргород О. В., Трушов Я. Р. Аналіз деяких вогнестійких властивостей залізобетонних конструкцій : дис. *Проблеми пожежної безпеки 2022 (Fire Safety Issues 2022)*: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, Харків, 2022. С. 23–24.

140. Гуліда Е. М., Коваль О. М. Вогнестійкість залізобетонних конструкцій скатних крівель одноповерхових будівель цехів деревообробних підприємств. *Науковий вісник НЛТУ України*. Львів, 2014. Т. 24. №. 7. С. 166–180.

141. Словінський В. К., Аксьонов В. В., Бугайчук О. І. Метод вирішення міцнісної задачі для оцінки вогнестійкості залізобетонної колони при її випробуванні на вогнестійкість. *Збірник наукових праць*. Черкаси, 2020. С. 70–72.

142. Алексєєв О. Способи підвищення вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій за допомогою тонкошарових вогнезахисних покриттів. *Матеріали IV Міжнародної студентської науково-технічної конференції „Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання“*. Черкаси, 2021. С. 134–135.

143. Нуянзін В. М. Розробка методики дослідження впливу кліматичних факторів на вогнестійкість залізобетонної колони. *Пожежна безпека: теорія і практика*. Черкаси, 2013. №. 15. С. 110–114.

144. Круковський П.Г. Зворотні завдання тепломасоперенесення (Загальний інженерний підхід). Київ: *НАНУ Інститут технічної теплофізики*, 1998. 224 с.

145. Сідней С. Розробка методики розрахунку розподілу температури у плоских залізобетонних плитах при пожежі. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. Черкаси, 2021. Т. 5. №. 2. С. 83–88.

146. Мельник І. В. и др. Випробування на вогнестійкість фрагментів монолітного залізобетонного перекриття з пінополістирольними вставками. *Збірник наукових праць «Будівельні конструкції. Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону»*. Київ, 2013. С. 362–370.

147. Глива В. Експериментальні дослідження залізобетонних балок при впливі високих температур. Київ, 2016. С. 21–27.

148. Фомін С.Л. Стельмах О.А., Джафар Шакер Шахін. Вогнестійкість центрально стислих залізобетонних елементів. *Пожежна безпека: Організаційно-технічне забезпечення*. Харків: ХІПБ МВС України, 1996. С. 78–81.

149. Поздєєв С. В. та ін. Відновлення температурного поля у перерізі залізобетонної колони за даними вогневих випробувань. *Державна служба України з надзвичайних ситуацій*. 2013. С. 78.

150. Фомін С.Л. Моделювання тепло- та вологоперенесення в залізобетонних конструкціях при впливі кліматичного, технологічного та пожежного середовищ. *Електронне моделювання*. 1999. Т.21. № 4. С. 28–32.

151. Фомін С.Л. Повна діаграма бетону та арматури при нагріванні. Київ: *Техніка*, 1997. Вип. 8. С. 27–29.

152. Фомін С.Л. Вогнестійкість та залишкова міцність залізобетонних конструкцій. *Матеріали першої всеукраїнської науково-технічної конференції «Науково-практичні проблеми сучасного залізобетону»*. Київ, 1996. С. 183–185.

153. Фомін С.Л. Діаграма стану арматури для розрахунку залізобетонних конструкцій при нормальних та високих температурах. *Будівельні конструкції: Міжвідомч. наук.-техн. збірник*. Київ: НДІБК, 2005. Т. 1. С. 372–379.

154. Фомін С.Л. Вогнестійкість багатоповерхових каркасних будівель. *Будівельні конструкції: Міжвідомч. наук.-техн. збірник*. Київ: НДІБК, 2005. Т. 2. С. 310-315.

155. Фомін С.Л. Розрахунок залізобетонних конструкцій на температурно-вологісні впливи технологічного та кліматичного середовища: [навч. посібник]. Київ: УМК ВО, 1992. 164 с.

156. Lie T.T. Characteristic temperature curves for various fire severities. *"Fire Technol"*, 1974. 10, № 4. P. 315–326.
157. Lie T.T. A Procedure to Calculate Fire Resistance of Structural Members. *International Seminar on Three Decades of Structural Fire Safety*, 22/23, February 1983. pp.139–153.
158. Ruvalcaba Ayala F.R. Mechanical properties and structural behaviour of masonry at elevated temperatures. *A thesis submitted to The University of Manchester for the degree of Doctor of Philosophy*. 2010. 294 p.
159. Sundstrom B. Test Methods and Their use for Fire Safety Engineering. *Materiały V Międzynarodowy Konferencji "Bezpieczeństwo pożarowe budowli"*. – 2005. P. 141–150.
160. Harmathy T.Z. Fire resistance versus flame spread resistance. *Fire Technol.*, 1976. v. 12, N 4. P. 290–302.
161. ДСТУ-Н Б EN 1994-1-1: 2010 Єврокод 4. Проектування сталезалізобетонних конструкцій. *Частина 1-1. Загальні правила та правила для будівель*.
162. Щіпець С. Д. Удосконалення методу випробувань на вогнестійкість залізобетонних та кам'яних несучих стін: дис. кандидата техн. наук : 21.06.02 / Щіпець Станіслав Дмитрович. Львів, 2015. 147 с.
163. Shnal T. Pozdieiev S., Yakovchuk R., Nekora O., Sidnei S. Mathematical modeling of fire development in a three-storey residential building during full-scale fire tests. *Пожежна безпека*. – 2020. Т. 36. С. 121–130.
164. Несен І. и др. Дослідження теплового впливу на залізобетонні сходові марші в умовах вогневих випробувань. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. Черкаси, 2022. Т. 6. №. 2. С. 73–82.
165. Поздєєв С.В., Тищенко О.М. Дослідження ефективності математичних моделей теплопередачі для розв'язку теплотехнічної задачі при визначенні вогнестійкості залізобетонних конструкцій. Черкаси: Збірник наукових праць. *Пожежна безпека: теорія і практика. Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля*, 2010. Випуск № 5. С. 122–129.

166. Поздєєв С.В. Дослідження ефективності математичних моделей напружено-деформованого стану при визначенні вогнестійкості залізобетонних плит. Черкаси: *Збірник наукових праць. Пожежна безпека: теорія і практика. Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля*, 2010. Випуск № 6. С. 125–133.

167. Поздєєв С.В. Математичне моделювання напружено-деформованого стану залізобетонної балки під час пожежі. *Проблеми пожежної безпеки. Харків: НУДЗУ*, 2010. Вип. 27. С. 163–174.

168. Поздєєв С.В. Експериментально-розрахунковий метод визначення механічних характеристик бетону за умов нагрівання. *Проблеми пожежної безпеки. Харків: НУЦЗУ*, 2010. Вип. 28. С. 133–140.

169. Поздєєв С.В. Дослідження ефективності розрахункових методів визначення межі вогнестійкості преднапряженої ребристої залізобетонної плити. *Науковий вісник Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки. Київ: УкрНДІПБ*, 2010. № 2 (24). С.5–11.

170. Поздєєв С.В. Дослідження ефективності вогнезахисної обробки залізобетонних балок покриттями, що спучуються. *Вісник житомирського державного технологічного університету. Житомир: ЖДТУ*, 2010. №3(54). С.12–16.

171. Поздєєв С.В. Дослідження ефективності математичних моделей напружено-деформованого стану при визначенні вогнестійкості залізобетонних балок. *Пожежна безпека : [зб. наук. праць]*. Львів: ЛДУБЖД, 2010. № 17. С. 115–122.

172. Поздєєв С.В. Дослідження адекватності результатів математичного моделювання тепломасообміну у вогневій печі при випробуваннях залізобетонної плити на вогнестійкість. Черкаси: *Збірник наукових праць. Пожежна безпека: теорія і практика. Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля*, 2010. Випуск № 6/1. С. 60–65.

173. Поздєєв С.В., Левченко А.Д. Розробка уточненого розрахункового методу для визначення межі вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій.

Науковий вісник національного технічного університету «Львівська політехніка».

Львів: НТУ «Львівська політехніка», 2011. С. 264–269

174. Sidnei S. et al. Forecasting the Behavior of Steel Beams with Corrugated Walls Under the Thermal Exposure of a Fire. *Proceedings of EcoComfort 2022. Cham : Springer International Publishing, 2022. С. 388-398.*

175. EN 1996-1-2:2005 Eurocode 6: Design of masonry structures Part 1-2: General rules - Structural fire design, Brussels, 2004.

176. Moré J. J., Sorensen D. C. Computing a trust region step. *SIAM Journal on scientific and statistical computing*, 1983. Т. 4. №. 3. P. 553–572.

177. Gill P. E., Murray W. Algorithms for the solution of the nonlinear least-squares problem. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 1978. Т. 15. №. 5. P. 977–992.

178. Pujol J. The solution of nonlinear inverse problems and the Levenberg-Marquardt method. *Geophysics*. 2007. Т. 72. №. 4. P. W1–W16.

179. Wright J. N. S. J. *Numerical optimization*, 2006. Springer.

180. Словінський В. К. Удосконалення методу випробувань на вогнестійкість залізобетонних колон: дис. кандидата техн. наук : 21.06.02. Словінський Віталій Казимірович. Черкаси, 2014. 147 с.

181. Капцов І. І., Ромашко О. В., Гапонова Л. В. та ін. Методичні вказівки до науково-дослідницької практики з дисципліни «Організація наукових досліджень» (Статистичні методи. Аналіз та оформлення наукових досліджень). Харків: ХНАМГ, 2009. 59 с.

182. Жлуктенко В. І., Наконечний С. І. Теорія ймовірностей і математична статистика. Київ: КНЕУ, 2000. 196 с.

183. Найко Д. А., Шевчук О. Ф. Теорія ймовірностей та математична статистика. *Навч. посіб.* Вінниця: ВНАУ, 2020. 382 с.

184. Григор'ян Б.Б. Розрахунок вогнестійкості стиснутих залізобетонних колон із випадковим ексцентриситетом при заданому режимі пожежі. *Науковий вісник будівництва.* Харків: ХДТУБА, 2000. Вип. 10. С. 211–216.

185. Григор'ян Б.Б. Нормування необхідних меж вогнестійкості стиснутих залізобетонних колон при реальному режимі пожежі на експериментальній

основі. *Республіканський міжвідомчий науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст»*. Київ: Вид-во "Техніка", 2000. Вип. 8. С. 27–29.

186. Ямшинський М. М., Федоров Г. Є., Радченко К. С. Термостійкість жаростійких сталей для роботи в екстремальних умовах. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2015. №. 3. С. 33–37.

187. Поздєєв С.В., Григорян Б.Б., Поздєєв А.В. Удосконалення експериментально-розрахункової методики визначення залишкової несучої здатності залізобетонних колон після пожежі. *Системи обробки інформації: [збірник наукових праць]*. Харків: ХУПС, 2005. Випуск 7(47). С. 133–143.

188. Мілюкова І. Р. Застосування математичного пакету MathCAD при розв'язанні задач з фізики. *Фізико-математична освіта*. Запоріжжя, 2019. №. 2 (20). С. 99–106.

189. Тортяник О. І., Дьков О. Г., Воронцова Ж. В. Застосування MathCAD для визначення параметрів складної нелінійної моделі. Київ, 2012. С. 186–192

190. Халанчук Л. В., Халанчук Л. В. Застосування пакету MathCAD на лабораторних заняттях з вищої математики. Харків, 2021. 128 с.

191. Боровик Л. В., Рудик О. Ю., Ружицький А. В. Застосування mathcad для аналізу результатів наукового експерименту. сучасні технології в механіці. С. 179.

192. Борсук О. В. Дисертація. Удосконалення методу розрахункової оцінки вогнестійкості сталевих балок із вогнезахисним мінераловатним облицюванням : *дис.* Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2021. 186 с.

193. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-3: 2012 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-3. *Загальні правила*.

194. Отрош Ю. А., Андрієнко В. М., Поздєєв С. В., Єременко С. А., Тищенко О. М., Некора О. В., Нуянзін О. М. Будівлі та споруди та їх поведінка в умовах пожежі. *Навчальний посібник*. Київ: «Українська технологічна група», 2014. 294 с.

195. Костенко В. К., Покалюк В. М., Майборода А. О., Нуянзін О. М. та ін. Фізико-хімічні процеси розвитку та припинення горіння. *Навчальний посібник. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2016. 156 с.*

196. Нуянзін О. М., Борсук О. В., Поздєєв С. В. та ін. Розрахункова оцінка вогнестійкості вогнезахищених сталевих балок. Черкаси: *Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. 118 с.*

197. Нуянзін О. М., Пальчинська В. С. Обчислювальний експеримент тепломасообміну випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій. *Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції: Теорія і практика ліквідації надзвичайних ситуацій. Черкаси, 2014 р. С. 156–157.*

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

199. Нуянзін О. М., Пальчинська В. С. Математичні моделі тепломасообміну у камерах вогневих печей установок для випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції. Черкаси, 2015. С. 65–66.*

200. Нуянзін О. М., Кришталь М. А., Стальний О. С., Яковенко А. С. Моделювання процесу горіння і теплопередачі за допомогою системи рівнянь Нав'є – Стокса для вирішення задач пожежної безпеки. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів і студентів «Пожежна та техногенна безпека: наука і практика». Черкаси: ЧПБ НУЦЗУ, 2016. С. 99.*

201. Нуянзін О. М., Радько Д. В. Розрахункова оцінка межі вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій будівлі за стандартним температурним режимом пожежі. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів та студентів «Пожежна та техногенна безпека: наука і практика». Черкаси, 2016. С. 53–54.*

202. Нуянзін О. М., Костенко Т. В., Покалюк В. К., Майборода А. О., Нестеренко А. А. Особливості теплового впливу пожежі на теплозахисний костюм пожежника. *Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Львів: ЛДУБЖД, 2016. С. 486–488.

203. Нуянзін О. М., Костенко Т. В., Покалюк В. К., Майборода А. О., Нестеренко А. А. Пропозиції щодо удосконалення засобів протитеплового захисту. *Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Львів: ЛДУБЖД, 2016. С. 422–424.

204. Нуянзін О. М., Сідней С. О., Медвідь Б. А. Моделювання процесів нестационарного теплообміну при випробуваннях залізобетонних конструкцій на вогнестійкість. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті: збірник VI-ї міжнародної науково-технічної конференції*. Харків: УкрДУЗТ, 2017. с. 142–143.

205. Куркурін Б. П., Шоріс Н. Ю., Нуянзін О. М. Математичне моделювання процесів нестационарного теплообміну та напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: матеріали XII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів*. Львів: ЛДУБЖД, 2017. С. 42–43.

206. Kostenko T., Maiboroda A., Pokaliuk V., Nuianzin O., Nesterenko A. *In XVIII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering, production engineering and physics»*. Series: Monografie Nr68. Czestochowa, 2017. P. 422–426.

207. Нуянзін О. М., Поздєєв С. В. Моделювання факелу полум'я при пожежі у ферментаторі. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2017. С. 220–221.

208. Боїшко Ю. Ю., Мовчун Є. С., Нуянзін О. М. Моделювання тепломасообміну випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів і студентів «Пожежна та техногенна безпека: наука і практика»*. Черкаси: ЧПБ НУЦЗУ, 2018. С. 5–6.

209. Нуянзін О. М., Перегін А. В., Самченко Т. В. Розробка математичної моделі процесу тепломасопереносу при пожежі у кабельному тунелі. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: *матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції* – Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. С. 131–134.

210. Нуянзін О. М., Володіна В. В., Димитрашко О. А. Забезпечення стійкості будівельних конструкцій кабельних тунелів при пожежі. *Всеукраїнська науково-практична конференція курсантів і студентів «Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених»*. Черкаси: ЧПБ НУЦЗУ, 2019. С. 17–19.

211. Нуянзін О. М., Володіна В. В., Ящук М. І. Дослідження процесів тепломасообміну під час умовної пожежі у ферментаторі. *Всеукраїнська науково-практична конференція курсантів і студентів «Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених»*. Черкаси: ЧПБ НУЦЗУ, 2020 р. С. 60–61.

212. Нуянзін О. М., Володіна В. В., Ящук М. І. Розрахунок безпечної протипожежної відстані між ферментаторами для виробництва біогазу. Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: *матеріали XV Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів*. Львів: ЛУБЖД, 2020. С. 41–42.

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

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

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

216. Нуянзін О. М., Кришталь В. М., Ведула С. А. Визначення залежності параметрів пожежі у кабельному тунелі від його характеристик. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: матеріали X Всеукр. наук.- практ. конф.* Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. С. 189–190.

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

218. Поздєєв С. В., Нуянзін О. М., Борсук О. В., Неділько І. А., Федченко С. М. Вивчення стану втрати вогнестійкості сталевих балок з вогнезахисним мінераловатним облицюванням. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: матеріали X Всеукр. наук.- практ. конф.* Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. С. 120–122.

219. Нуянзін О. М., Сідней С. О., Заїка П. І. Розробка математичної моделі температурного режиму пожежі у кабельному тунелі в залежності від його параметрів. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Енергоефективність на транспорті»*. Харків: УкрДУЗТ, 2020. С. 256–257.

220. Поздєєв С. В., Нуянзін О. М., Борсук О. В., Неділько І. А. Дослідження цілісності вогнезахисного мінераловатного облицювання сталеві

балки в умовах пожежі. Енергоефективність на транспорті: *Міжнар. наук.-практ. конф. Харків: УкрДУЗТ, 2020. С. 98–100*

221. Яценко А. О., Ящук М. І., Нуянзін О. М. Експериментальна оцінка коефіцієнту спучування фрагментів вогнезахисного покриття. Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів і студентів. Черкаси: Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. С. 74–75.*

222. Ящук М. І., Яценко А. О., Некора В. С., Нуянзін О. М. Дослідження вогнестійкості сталеві балки. *Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів і студентів. Черкаси: Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. С. 76–77.*

223. Нуянзін О., Дружко Н. Вплив параметрів приміщень на фактичну межу вогнестійкості металевих конструкцій. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. С. 206–208.*

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

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

226. Нуянзін О. М., Кришталь В. М., Ведула С. А., Самченко Т. В. Розрахункова оцінка класу вогнестійкості будівельних конструкцій кабельних

тунелів. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю.* – Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. С. 174–175.

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

228. Нуянзін О. М., Фіцай-Бодак Н. В. Дослідження температурного режиму під час пожежі в кабельних тунелях із різними параметрами. Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів, студентів, ад'юнктів (аспірантів).* Черкаси: Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. С. 68–69.

229. Самченко Т., Нуянзін О., Григор'ян М. Дослідження щодо вимог пожежної безпеки збірних систем фасадної теплоізоляції зовнішніх стін будинків і споруд. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю.* Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. С. 68–70.

230. Борсук О., Нуянзін О. Розрахунок напружено-деформованого стану сталеві балки із вогнезахисним облицюванням з мінеральної вати. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю.* Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. С. 82–84.

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

232. Нуянзін О., Кришталь М., Прокопець А. Дослідження точності та достовірності результатів розрахунку прогрівання сталевих стержнів із мінераловатним вогнезахисним облицюванням. *Теорія і практика гасіння пожеж*

та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції. Черкаси, 2022. С. 167–169.

233. Поздєєв С., Некора О., Нуянзін О., Борсук О., Заїка Н. Комп'ютерне моделювання поведінки сталевих балок із мінераловатним вогнезахисним покриттям при нагріванні. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції.* Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. С.177–178.

234. Самченко Т., Нуянзін О., Ведула С. Побудова математичної моделі температурного режиму пожежі у кабельному тунелі. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю.* Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. С. 188–189.

235. Яценко А. О., Решетник В. І., Нуянзін О. М. Дослідження коефіцієнту спучування фрагментів вогнезахисного покриття після тривалої експлуатації. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених.* Харків: НУЦЗУ, 2022. с. 99.

236. Нуянзін О. М., Борсук О. В. Результати досліджень поведінки сталеві балки із вогнезахисним облицюванням з мінеральної вати під час нагрівання за стандартним температурним режимом пожежі. *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: Зб. наук. праць Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю.* Львів: ЛДУ БЖД, 2022. С. 163–165.

237. Барковський В. В., Барковська Н. В., Лопатін О. К. Теорія ймовірностей та математична статистика. Київ: ЦУЛ, 2002. 448 с.

238. Гуткевич С. О., Шендерівська Л. П. Політика ефективного розвитку підприємств: управлінський аспект : *монографія.* Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 211 с.

239. Іванюта І. Д., Рибалка В. І., Рудоміно-Дусятська І. А. Елементи теорії ймовірностей та математичної статистики. Київ: Слово, 2003. 272с.

240. Каніовська І. Ю. Теорія ймовірностей у прикладах і задачах. *Київ: ІВЦ "Видавництво «Політехніка»", ТОВ "Фірма«Періодика»", 2004. 156 с.*
241. Кушлик-Дивульська О. І., Горбачук В. М. Теорія ймовірностей та математична статистика. Київ, 2023. 262 с.
242. Кушлик-Дивульська О. І., Поліщук Н. В., Орел Б. П., Штабальок П. І. Теорія ймовірностей та математична статистика: *навч. посіб.* Київ: НТУУ «КПІ», 2014. 212 с.
243. Кушлик-Дивульська О. І., Селезньова Н. П. Вища математика: Елементи теорії ймовірності: *Практикум.* Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 105 с.
244. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт (комп'ютерного практикуму) з дисципліни «Теорія ймовірностей і математична статистика» для студентів напряму підготовки 6.030601 «Менеджмент» студентів *Видавничополіграфічного інституту.* Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 205 с.
245. Оленко А. Я. Комп'ютерна статистика: *навч. посіб.* Київ: Вид. поліграф. Центр «Київський університет», 2007. 174 с.
246. Селезньова Н. П., Рудик Т. О. Спеціальні питання вищої математики. Елементи теорії ймовірностей. *Теорія і практикум.* Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 78 с.
247. Zolotukhina K., Khadzhynova S., Velychko O., Kushlyk V., Kushlyk-Dyvulska O. Researching the interaction of different printed materials types with liquids. *Eastern-european journal of enterprise technologies*, 2019. 3/1 (99). P. 26–35.
248. Хаджинова С. Є., Золотухіна К. І., Кушлик Б. Р., Кушлик-Дивульська О. І. Виявлення залежностей експериментальних досліджень крайового кута змочування. Київ: ВПІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. №4(62). С.27–38.
249. Валеев К. Г., Джалладова І. А. Вища математика: *Навч. посібник: У 2-х ч.* Київ: КНЕУ, 2001. Ч. 1. 546 с.
250. Валеев К. Г., Джалладова І. А. Вища математика: *Навч. посібник: У 2-х ч.* Київ: КНЕУ, 2002. Ч. 2. 451 с.

251. Гевко Б.М. Лотоцький Р.І., Пришляк В.М. Математичне моделювання руху зерна по рухомим поверхням висівних апаратів. Сільськогосподарські машини: *Зб. наук. ст. Вип. 26*. Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2013. С. 27–35.

252. Збірник задач з вищої математики. *За ред. Ф.С. Гудименка*. Київ: КУ, 1967. 352 с.

253. Куценко А.Г. Бондар С. М., Пришляк В. М. Біомеханіка суцільних середовищ: монографія. Київ: НУБіП України, 2014. 512 с

254. Куценко А.Г., Бондар М.М., Пришляк В.М., Шимко Л.С. Прикладна механіка в прикладах та задачах: *підручник*. Ніжин: ТОВ «Видавництво «Аспект – Поліграф», 2015. 804 с.

255. Пришляк В.М. Погорілець О. М. Сільськогосподарські машини: розрахунок, проектування. *Методичні вказівки до виконання курсової роботи*. Вінниця: ВНАУ, 2015. 60 с.

256. Стрижак Т. Г., Коновалова Н. Р. Математический анализ. Київ: *Либідь*, 1995. 240 с.

257. Сарана П. А. Елементи теорії гармонійних та субгармонічних функцій: *метод. допомога. для студ. вищих пед. навч. закл.* Житомир: ЖДПУ, 2002. 66 с.

258. Дуда О. М., Дуда М. О., Карпінський М. П. Елементарні функції у неklasичній двозначній алгебрі логіки. *Науковий вісник Чернівецького університету. Фізика, електроніка*. Чернівці, 2000. №. 92. С. 101–108.

259. Роде Г. Г. Перенос похибок та середніх вимірів фізичної величини для елементарних функцій $\cos(x)$ та $\arccos(x)$. *Український фізичний журнал*. 2016. №. 61, 4. С. 355–362.

260. Шунда Н. Н. Функції та їх графіки: *посібник для вчителя. 2-ге вид.* Київ: Порад. шк., 1983. 190 с.

261. Ушаков Р. П., Хацет Б. І. Випуклі функції та нерівності. Харків: *Основа*, 2009. 123 с.

262. Мельник О. Г. Моделювання дискретних елементарних функцій для криптографічного перетворення. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2015. №. 1. С. 151–153.

263. Сидоренко Ю. В., Городецький М. В. Аналіз роботи алгоритму інтерполяційної функції Гауса на елементарних алгебричних функціях. *Сучасні проблеми моделювання*. 2020. №. 19. С. 138–145.

264. Поздєєв С. В. та ін. Метод інтерпретації температурних полів у перерізі залізобетонних балок. *Academic journal Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2015. Т. 2. №. 44. С. 70–78.

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

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

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

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

269. Нуянзін О. М., Покалюк В. К., Майборода А. О., Нестеренко А. А. Моделювання тепломасообміну в камері вогневої печі при випробуваннях на вогнестійкість несучої стіни. *Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції Надзвичайні ситуації безпека та захист*. Черкаси, 2015. С. 115–117.

270. Нуянзін О. М., Болжаларський К. В., Андрущенко А. В., Задорожний А. О. Застосування повної системи рівнянь Нав'є-Стокса для вирішення задач пожежної безпеки. *Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції Надзвичайні ситуації безпека та захист*. Черкаси, 2015. С. 109–111.

271. Нуянзін О. М., Поздєєв С. В., Сідней С. О., Федченко І. В. Вплив конструктивних особливостей вогневих печей на достовірність результатів випробувань стін на вогнестійкість. *Матеріали 17 Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників*. Київ, 2015. С. 282–284.

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

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

274. Нуянзін О. М., Поздєєв С. В., Сідней С. О. Перевірка адекватності математичної моделі тепломасообміну випробувань на вогнестійкість несучих стін. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції: Прикладні аспекти техногенно-екологічної безпеки*. Харків, 2015. С. 26–28.

275. Шевченко Р. І. Визначення теоретичних основ інформаційно-комунікативного підходу до формування та аналізу систем моніторингу надзвичайних ситуацій. Харків, 2016. С. 202-210.

276. Нуянзін О. М., Болжаларський К. В. Математичне моделювання процесу тепломасообміну в камерах вогневих печей для випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів і студентів «Пожежна та техногенна безпека: наука і практика»*. Черкаси: ЧІПБ НУЦЗУ, 2016. С. 101.

277. Нуянзін О. М., Заїка П. І., Черниш Р. А., Ведула С. А. Розрахункова оцінка межі вогнестійкості залізобетонної балки за результатами вогневих

випробувань без механічного навантаження. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2022. № 6 (2). С. 82–94.

278. Aksenov A. A. et al. Simulation of 3D flows past hypersonic vehicles in FlowVision software. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2015. Т. 653. №. 1. P. 012072.

279. Девін В. В., Ткачук В. С. Моделювання процесу роботи лопатевого змішувача в програмному комплексі Flow Vision. *Podilian Bulletin: Agriculture, Engineering, Economics*. 2016. Т. 2. №. 24. С. 65–72.

280. Каменська І. С. та ін. Практикум з теорії горіння та вибуху. Переяслав-Хмельницький: ДВНЗ "ПХДПУ імені Григорія Сковороди", 2018. 186 с.

281. Андрійшин М. П., Марчук Я. С., Бойченко С. В., Рябоконт Л. А. Газ природний, палива та оливи. Одеса: *Астропринт*, 2010. 230 с.

282. Українська нафтогазова енциклопедія. *За ред. В. Іванишина*. Львів, 2016. 403 с.

283. Pozdieiev S., Nuianzin O., Binetska O., Borsuk O., Shvydenko A., Alimov V. Temperature effect on the thermal-physical properties of fire-protective mineral wool cladding of steel structures under the conditions of fire resistance tests. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Т. 4 (12–106). P. 39–45.

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

285. Нуянзін О. М., Болжаларський К. В., Федоренко Д. С. Аналитическое моделирование испытаний на огнестойкость строительных конструкций в среде CFD FlowVision 2.5. *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції: Надзвичайні ситуації безпека та захист*. Черкаси, 2014. С 110–111.

286. Нуянзін О. М., Поздєєв С. В. Розрахунок параметрів факелу полум'я при пожежі у ферментаторі. *Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Львів: ЛДУБЖД, 2016. С. 492–494.

287. Нуянзін О. М., Костенко В. К. Математична модель теплообміну в ізоляційному одязі з системою охолодження та без неї. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2017. 224 с. С. 208–210.

288. Володіна В. В., Нуянзін О. М. Небезпечні фактори пожежі у підземних спорудах кабельних тунелів. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів і студентів «Пожежна та техногенна безпека: наука і практика»*. Черкаси: ЧПБ НУЦЗУ, 2018. С. 12–13.

289. Шоріс Н. Ю., Нуянзін О. М. Дослідження температурного режиму пожежі у кабельних тунелях. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів і студентів «Пожежна та техногенна безпека: наука і практика»*. Черкаси: ЧПБ НУЦЗУ, 2018. С. 86–87.

290. Боїшко Ю. Ю., Мовчун Є. С., Нуянзін О. М., Підгорецький Ю. Ю. Вимірювальних приладів на адекватність результатів випробувань на вогнестійкість. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2018. С. 155–156.

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

292. Нуянзін О. М., Сідней С. О., Самченко Т. В., Добростан О. В. Дослідження тепломасообміну при пожежі у підземних спорудах кабельних тунелів. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2018. С. 188–190.

293. Перегін А. В., Нуянзін О. М. Моделювання пожежі в кабельному тунелі. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій:*

матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2018. С. 198–199.

294. Шоріс Н. Ю., Кремінський В. М., Нуянзін О. М. Математичне моделювання тепломасопереносу під час пожежі у кабельному тунелі. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту»*. Харків: НУЦЗУ, 2018. С. 29–30.

295. Шоріс Н. Ю., Володіна В. В., Нуянзін О. М. Дослідження температурного режиму пожежі у кабельному тунелі. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: матеріали XII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів*. Львів: ЛУБЖД, 2018. С. 41–42.

296. Нуянзін О. М., Кришталь М. А., Азізлі Я. Ш. о., Гольопа О. С. Математичне моделювання тепломасообміну під час пожежі у нежитлових будівлях та спорудах. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2018. С. 115–116.

297. Нуянзін О. М., Володіна В. В. Пожежі в кабельних тунелях прямокутного перерізу. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту»*. Харків: НУЦЗУ, 2019. С. 19.

298. Нуянзін О. М., Перегін А. В., Ребедь В. І. та ін. Основні параметри побудови комп'ютерної моделі кабельного тунелю в середовищі FDS. *Збірник наукових праць «Надзвичайні ситуації попередження та ліквідація»*. Черкаси: Черкаський інститут імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. С. 255–257.

299. Нуянзін О. М., Прокопенко А. С. та ін. Аналіз математичних моделей тепломасообміну при пожежі у кабельних тунелях. *Збірник наукових праць «Надзвичайні ситуації попередження та ліквідація»*. Черкаси: Черкаський інститут імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. С. 257–259.

300. Самченко Т.В., Нуянзін О.М. Дослідження температурного режиму пожежі у кабельному тунелі. *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: Зб. наук. праць Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Львів: ЛДУ БЖД, 2022. С. 54 – 55.

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

302. Нуянзін О. М., Поздєєв С. В., Кришталь М. А. Конструкція горизонтальної вогневої печі для забезпечення достовірності результатів випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій. *Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку: матеріали 19 Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників*, м. Київ, 2017. С. 318–320.

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

304. Гуліда Е. М., Ренкас А. А. Вогнестійкість залізобетонних плит перекриття житлових та адміністративних будівель *Проблеми пожежної безпеки: Зб. наук. пр.* Харків, 2012. №. 32. С. 62-73.

305. Нуянзін О. М., Нуянзін В. М., Тищенко О. М. [та ін.]. Зміна вогнестійкості залізобетонних колон під дією кліматичних факторів. *Вид. 1-е*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2016. 136 с.

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

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

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

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

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

311. Нуянзін О. М., Карпенко В. Ю. Дослідження впливу конфігурації вогневих печей на результати випробувань несучих стін на вогнестійкість. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів та студентів «Пожежна та техногенна безпека: наука і практика»*. Черкаси, 2016. С. 29–30.

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

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

випробувань стін на вогнестійкість. *Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Львів: ЛДУБЖД, 2016. С. 495–496.

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

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

316. Семерак М.М., та ін. Труبوبетонні колони з вогнезахисним покриттям та їх поведінка в умовах пожежі. *Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси, 2018. С. 204.

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

318. Куркурін Б. П., Шоріс Н. Ю., Нуянзін О. М. Дослідження напружено-деформованого стану несучих залізобетонних стін при стандартному температурному режимі пожежі. *Пожежна та техногенна безпека: наука і практика: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів і студентів*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2017. С. 60–62.

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

320. Куркурін Б. П., Шоріс Н. Ю., Нуянзін О. М. Розрахунок межі вогнестійкості залізобетонної несучої стіни, що випробується при стандартному температурному режимі пожежі. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту»*. Харків: НУЦЗУ, 2017. С. 72.

321. Нуянзін А. М., Кришталь М. А., Кришталь Д. О. Визначення несучої здатності залізобетонних стін шляхом кінцевих елементів. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси, 2017. С. 219–220.

322. Нуянзін О. М., Сідней С. О., Березовський О. І. Дослідження впливу дизайну камер вогневих печей на адекватність результатів випробувань стін на вогнестійкість. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2017. С. 222–223.

323. Кришталь М. А., Нуянзін О. М., Добростан О. В., Самченко Т. В. Пожежна небезпека сучасних теплоізоляційних матеріалів. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2017. 224 с. С. 93–94.

324. Агрич Р. В., Болжаларський К. В., Нуянзін О. М. Математичне моделювання випробувань на вогнестійкість несучої стіни при стандартному температурному режимі пожежі. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2017. С. 202–204.

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

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

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

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

ДОДАТКИ

Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації

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

1. **Nuianzin O.**, Pozdieiev S., Hora V., Shvydenko A., Samchenko T. Cable tunnels temperature fire mode experimental study. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Т. 3. Р. 21–28.

2. Pozdieiev S., **Nuianzin O.**, Binetska O., Borsuk O., Shvydenko A., Alimov B. Temperature effect on the thermal-physical properties of fire-protective mineral wool cladding of steel structures under the conditions of fire resistance tests. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Т. 4 (12–106). Р. 39–45.

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

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

Статті в наукових періодичних виданнях інших держав

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

20. Борсук О. В., **Нуянзін О. М.**, Кришталь В. М., Ведула С. А., Горovenko М. М. Дослідження межі вогнестійкості сталеві балки за умови втрати

цілісності вогнезахисного покриття. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. Черкаси, 2020. № 4 (2). С. 5–15.

21. Поздєєв С. В., **Нуянзін О. М.**, Сідней С. О., Новгородченко А. Ю., Борсук О. В. Дослідження нагрівання сталевих двотаврових стержнів із мінераловатним вогнезахисним облицюванням в умовах стандартного температурного режиму пожежі. *Геотехнічна механіка*. 2020. № 152. С. 116–126.

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

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

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

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

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

Патенти на корисну модель

27. Тищенко О. М., Поздєєв С. В., **Нуянзін О. М.**, Сідней С. О., Кришталь Д. О. Вертикальна вогнева піч для проведення випробувань на

вогнестійкість із рівномірним прогрівом будівельних конструкцій. *Патент України на корисну модель* № 138081, опубл. 25.11.2019, Бюл. № 25.

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

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

Монографії

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

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

Інші публікації

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

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

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

Наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації

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

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

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

38. **Нуянзін О. М.**, Поздєєв С. В., Сідней С. О., Федченко І. В. Вплив конструктивних особливостей вогневих печей на достовірність результатів випробувань стін на вогнестійкість. *Матеріали 17 Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників*, м. Київ, 2015. С. 282–284.

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

40. **Нуянзін О. М.**, Покалюк В. М., Майборода А. О. Обчислювальний експеримент випробувань на вогнестійкість несучих стін. *Матеріали*

Міжнародної науково-практичної конференції: Прикладні аспекти техногенно-екологічної безпеки, м. Харків, 2015. С. 25–26.

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

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

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

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

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

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

47. **Нуянзін О. М.**, Поздєєв С. В., Кришталь М. А. Конструкція горизонтальної вогневої печі для забезпечення достовірності результатів випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій. *Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку: матеріали 19 Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників*, м. Київ, 2017. С. 318–320.

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

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

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

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

52. **Нуянзін О. М.**, Діденко В. В. Уточнений метод розрахункової оцінки межі вогнестійкості залізобетонної плити. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної*

конференції. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. С. 131–134.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

66. Перегін А., **Нуянзін О.**, Діденко Т. Верифікація даних отриманих під час експериментів з нагрівання малогабаритних елементів залізобетонних стін. *Теорія*

і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції. Черкаси, 2022. С. 169–170.

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

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

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

Додаток Б. Відомості про апробацію результатів дисертації

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

Додаток В. Акти впровадження результатів дисертації

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Інженерно-проектно-виробнича компанія «Спецзахист»

Денис ЛЮБЧЕНКО



«14» 02 2023р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Нуянзіна Олександра Михайловича на тему

«Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій з використанням малогабаритних модульних вогневих печей»

Цей акт складено про те, що результати досліджень, представлених у дисертаційній роботі Нуянзіна Олександра Михайловича, було застосовано у роботі ТОВ «Інженерно-проектно-виробнича компанія «Спецзахист».

Результати проведених досліджень мають практичну цінність у розрізі розроблених удосконалень щодо процесу проведення та оцінки на вогнестійкість несучих залізобетонних будівельних конструкцій, що застосовують, зокрема, при будівництві кабельних тунелів та напівповерхів. Ці вдосконалення стосуються поєднання експериментальних та розрахункових методів визначення вогнестійкості та здатне зменшити затрати у порівнянні з випробуваннями на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій. Даний напрямок є перспективним для діяльності підприємства.

Заступник директора
ТОВ «Інженерно-проектно-виробнича
компанія «Спецзахист»

Роман СОВГИРЯ

«14» 02 2023р.

ЗАТВЕРДЖУЮ



Директор ТОВ «Атоменергоресурс»

О. В. Миколук

« 22 » 02 2023р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Нуянзіна Олександра Михайловича на тему

«Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій з використанням малогабаритних модульних вогневих печей»

Цей акт складено про те, що результати досліджень, представлених у дисертаційній роботі Нуянзіна Олександра Михайловича, було застосовано у роботі ТОВ «Атоменергоресурс».

У процесі роботи було досліджено закономірності зміни температурних полів у перерізах несучих залізобетонних будівельних конструкцій та обґрунтовано схеми інтерполяції температурних розподілів для основних несучих будівельних конструкцій. Також були створені комп'ютерні моделі засобів випробувань у розрахункових комплексах CFD, що здатні враховувати нестационарний теплообмін при високій швидкості потоків рідин та газів. Сучасні та високоточні методи проектування засвідчують адекватність отриманих результатів.

На основі проведених досліджень створено систему, що поєднує експериментальні дослідження та розрахунки для перенесення результатів на реальні об'єкти.

інженер

ТОВ «Атоменергоресурс»

« 22 » 02 2023р.

С.С. Семенов

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший заступник начальника
Інституту державного управління та
наукових досліджень
з цивільного захисту

 Валерій БОРИС
« 22 » 2023 року

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
НУЯНЗІНА Олександра Михайловича на тему:
«Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості залізобетонних
будівельних конструкцій з використанням малогабаритних модульних
вогневих печей»

Складено комісією:

голова комісії: заступник начальника ІДУ НД ЦЗ канд. техн. наук, ст.
наук. співроб. КОВАЛЕНКО Віталій Володимирович;

члени комісії:

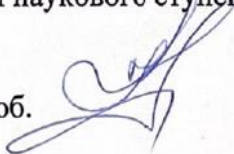
головний науковий співробітник науково-випробувального центру
ІДУ НД ЦЗ д-р техн. наук, ст. наук. співроб. ЖАРТОВСЬКИЙ Сергій
Володимирович;

заступник начальника науково-випробувального центру ІДУ НД ЦЗ
канд. техн. наук, ст. досл. ДОБРОСТАН Олександр Васильович.

Комісія перевірила та цим актом засвідчує, що результати
дисертаційної роботи НУЯНЗІНА Олександра Михайловича на тему:
«Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості залізобетонних
будівельних конструкцій з використанням малогабаритних модульних
вогневих печей» впроваджено у випробувальну діяльність науково-
випробувального центру Інституту державного управління та наукових
досліджень з цивільного захисту шляхом застосування отриманої методичної
бази оцінки вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій
без використання механічного навантаження у процесі проведення вогневих
випробувань.

Акт складено для надання в спеціалізовану вчену раду у зв'язку із
захистом дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Голова комісії
канд. техн. наук, ст. наук. співроб.



Віталій КОВАЛЕНКО

Члени комісії
д-р техн. наук, ст. наук. співроб.



Сергій ЖАРТОВСЬКИЙ

канд. техн. наук, ст. досл.



Олександр ДОБРОСТАН

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший заступник начальника

ГУ ДСНС України

у Черкаській області

доктор філософії

полковник служби цивільного захисту

Андрій ХИЖНЯК

«10» 03 2023 року

АКТ**впровадження результатів дисертаційної роботи****Нуянзіна Олександра Михайловича за темою:**

«Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій з використанням малогабаритних модульних вогневих печей»

Комісія у складі: начальника відділу ресурсного забезпечення ГУ ДСНС України у Черкаській області доктора філософії Мотрічука Р. Б. - голова комісії та членів комісії: завідувача кафедри пожежно-профілактичної роботи ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України доктора технічних наук, професора Кириченко О. В.; доцента кафедри безпеки об'єктів будівництва та охорони праці ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України кандидата технічних наук Сіднея С. О. цим актом засвідчує, що результати дисертаційної роботи Нуянзіна О. М. на тему: «Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій з використанням малогабаритних модульних вогневих печей» впроваджено у діяльність ГУ ДСНС України у Черкаській області шляхом удосконалення науково-методичної бази у галузі пожежної безпеки на будівельних об'єктах. Використання розроблених методик дозволяє забезпечити ефективність оцінювання вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій.

Голова комісії:

Роман МОТРИЧУК

Члени комісії:

Оксана КИРИЧЕНКО

Станіслав СІДНЕЙ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник Черкаського інституту
пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету
цивільного захисту України
кандидат технічних наук, професор
генерал-майор служби цивільного захисту

Віктор ГВОЗДЬ
«27» лютого 2023 року

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Нуянзіна Олександра Михайловича на тему «Розвиток наукових основ
оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій з
використанням малогабаритних модульних вогневих печей»

Розробник канд. техн. наук, доцент Нуянзін Олександр Михайлович, з однієї сторони та начальник кафедри безпеки об'єктів будівництва та охорони праці канд. техн. наук, доцент Березовський Андрій Іванович з іншої сторони, склали акт про те, що результати дисертаційної роботи за темою: «Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій з використанням малогабаритних модульних вогневих печей» має теоретичне та практичне значення для освітнього процесу. У дисертаційній роботі проведено дослідження процесів тепломасообміну у камерах вогневих печей та змодельовано роботу більш ніж 10 конфігурацій камери вогневої печі різними параметрами. Отримані результати дозволили спроектувати та побудувати малогабаритну зогневу випробувальну установку на базі ЧПБ ім Героїв Чорнобиля НУЦЗ України:

З метою підвищення ефективності підготовки фахівців для ДСНС України результати дисертаційної роботи впроваджено в освітній процес при підготовці фахівців першого рівня вищої освіти на кафедрі безпеки об'єктів будівництва та охорони праці при викладанні дисциплін: «Стійкість будівель та споруд при пожежі» за спеціальністю 261 «Пожежна безпека», а також «Стійкість будівель та споруд в умовах надзвичайних ситуацій» за спеціальністю 263 «Цивільна безпека» (протокол кафедри № 20 від 27.03.2023).

Впровадження результатів забезпечує актуальний характер освіти та високий науково-методичний рівень викладанні даних дисциплін і дозволяє підвищити якість проведення лекційних і практичних занять для здобувачів вищої освіти.

Начальник кафедри безпеки
об'єктів будівництва та охорони праці
канд. техн. наук, доцент

Андрій БЕРЕЗОВСЬКИЙ

Розробник
канд. техн. наук, доцент

Олександр НУЯНЗІН